



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



INTRODUCCIÓN DE LA TRAYECTORIA DE VUELO EN UN DRON DISPENSADOR DE SENSORES TERRESTRES. ESTUDIO DE APLICACIÓN AL INCENDIO DE CORTES DE PALLÁS DE 2012.

Trabajo Final del Grado en Ingeniería Aeroespacial

Curso académico: 2020/2021

Autor: Miñana Navarro, Ana

Tutorizado por: Mateo Pla, Miguel Ángel

Director experimental: Vinué Visús, David

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Universitat Politècnica de València

Resumen

Tras los incendios ocurridos en 2012 en la Comunidad Valenciana, investigadores pertenecientes al Instituto de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (ITACA) han decidido crear un proyecto llamado ETHON. En él se propone una solución para poder monitorizar incendios y reducir los daños con la ayuda de un dron que cuenta con un dispensador de sensores terrestres, los cuales permiten obtener datos que informan del estado del terreno. El proyecto se encuentra en fase de desarrollo y, por tanto, carece de un sistema que calcule una ruta que realice el reparto de sensores maximizando la autonomía de la aeronave y atendiendo a las necesidades del grupo de bomberos, y todo ello de la forma más autónoma posible. El objetivo es desarrollar el código de programación que permite la implementación de dicha ruta, estudiando la legislación vigente en materia de drones para conocer las opciones de vuelo autónomo existentes y evaluar en qué condiciones de altitud y autonomía podrá operar la aeronave. La solución se presentará en el entorno MATLAB. Se trata de una ruta generalizada y válida para cualquier situación. En cambio, los resultados se particularizarán para el incendio que tuvo lugar en el municipio de Cortes de Pallás en el año 2012. Para ello, se ha consultado al técnico forestal Dr. Raúl Quílez y se ha seguido el avance del frente según su criterio. Una vez obtenidos los resultados, se ha examinado cuán determinante habría sido la implementación de esta tecnología en dicho incendio.

Abstract

After the fires that occurred in 2012 in the Valencian Community, researchers belonging to the Information and Communication Technologies Institute (ITACA) have decided to create a project called ETHON. In it, a solution is proposed to be able to monitor fires and reduce damage with the help of a drone that has a dispenser of terrestrial sensors, which allow obtaining data that informs the state of the terrain. The project that is in the development phase and, therefore, lacks a system that calculates a route that performs the distribution of sensors, maximizing the autonomy of the aircraft and meeting the needs of the firefighters' group, and all this in the most autonomous way. The programming code that allows the implementation of the route is developed in this work, studying the current legislation on drones to know the existing autonomous flight options and evaluating in which altitude and autonomy conditions the aircraft will be able to operate. The solution will be presented in the MATLAB environment. It is a generalized and valid route for any situation. Nevertheless, the results will be particularized for the fire that took place in Cortes de Pallás in 2012. For this, the forestry technician Dr. Raúl Quílez has been consulted and the advance of the front has been followed according to his criteria. Once the results were obtained, it has been examined how decisive the implementation of this technology would have been in said fire.

Resum

Després dels incendis ocorreguts el 2012 a la Comunitat Valenciana, investigadors pertanyents a l'Institut de Tecnologies de la Informació i Comunicacions (ITACA) han decidit crear un projecte anomenat ETHON. S'hi proposa una solució per poder monitoritzar incendis i reduir els danys amb l'ajuda d'un dron que compta amb un dispensador de sensors terrestres, els quals permeten obtenir dades que informen de l'estat de el terreny. El projecte es troba en fase de desenvolupament i, per tant, no té un sistema que calculi una ruta que realitzi el repartiment de sensors maximitzant l'autonomia de l'aeronau i atenent a les necessitats del grup de bombers, i tot això de la forma més autònoma possible. L'objectiu és desenvolupar el codi de programació que permet la implementació d'aquesta ruta, estudiant la legislació vigent en matèria de drones per conèixer les opcions de vol autònom existents i avaluar en quines condicions d'altitud i autonomia podrà operar l'aeronau. La solució es presentarà en l'entorn MATLAB. Es tracta d'una ruta generalitzada i vàlida per a qualsevol situació. En canvi, els resultats es particularitzaran per l'incendi que va tenir lloc al municipi de Cortes de Pallars l'any 2012. Per a això, s'ha consultat a l'tècnic forestal Dr. Raúl Quílez i s'ha seguit l'avanç de l'front segons el seu criteri. Un cop obtinguts els resultats, s'ha examinat com de determinant hauria estat la implementació d'aquesta tecnologia en aquest incendi.

Índice general

Índice general	IX
Índice de tablas	XI
Índice de figuras	XIII
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos del trabajo	1
2 Estudio del estado del arte	3
2.1 El dron a lo largo de la historia	3
2.2 El papel del dron en los desastres medioambientales.	6
2.3 La problemática de los incendios forestales en la Comunidad Valenciana.	8
2.4 El proyecto ETHON.	9
2.4.1 Fases del proyecto ETHON	9
2.5 Estudio legislativo	10
3 Análisis del problema	14
4 Materiales y métodos	18
4.1 Tecnologías del proyecto ETHON	18
4.1.1 El convertiplano VALAQ 120	18
4.1.2 Los sensores Bseed	19
4.2 Condiciones de vuelo	20
4.3 Área de aplicación	20
5 Diseño del código	26
5.1 Programa principal	26
5.2 Funciones	27

6	Resultados	33
6.1	Ruta genérica	33
6.2	Ruta 1: dos viajes con diferente carga	35
6.3	Ruta 2: un viaje con carga máxima	39
6.4	Ruta 3: reducción de sensores	40
6.5	Ruta 4: cambio de estación	43
6.6	Ruta 5: bombardeo de 2 líneas de fuego	47
7	Presupuesto	49
7.1	Costes asociados al personal	49
7.2	Costes asociados a la amortización de equipos	49
7.3	Costes asociados al software	50
7.4	Costes indirectos	50
7.5	Coste total	51
8	Conclusión y trabajos futuros	52
8.1	Conclusiones	52
8.2	Conclusiones personales	53
8.3	Trabajos futuros	53
A	ANEXO I. Funciones básicas	54
B	ANEXO II. Fichas técnicas	60
B.1	VALAQ 120	60
	Bibliografía	63

Índice de tablas

4.1	Condiciones de vuelo.	20
4.2	Franjas horarias con vientos inferiores a 30 km/h.	22
6.1	Distancia y batería de la ruta genérica.	34
6.2	Distancia y batería de la ruta genérica con la eficiencia mejorada.	35
6.3	Distancia y batería de la ruta 1.	36
6.4	Distancia y batería de la ruta 1 tras modificar la dirección.	38
6.5	Distancia y batería de la ruta 1 sin modificar la dirección pero mejorando su eficiencia.	38
6.6	Distancia y batería de la ruta 2.	39
6.7	Distancia y batería de la ruta 3.	42
6.8	Distancia y batería de la ruta 3 tras modificar la distancia entre sensores.	42
6.9	Distancia y batería de la ruta 4.	44
6.10	Distancia y batería de la ruta 4 tras cambiar la estación a Tous.	46
6.11	Distancia y batería de la ruta 5.	48
6.12	Tabla resumen de las 6 rutas.	48
7.1	Costes asociados al personal.	49
7.2	Costes asociados a la amortización de hardware.	50
7.3	Costes asociados a las licencias de software.	50
7.4	Costes indirectos.	50
7.5	Coste global.	51
A.1	Función <code>lanzamiento.m</code>	54
A.2	Función <code>angulo.m</code>	54

A.3	Función <code>rotacion_ini.m.</code>	55
A.4	Función <code>ida.m.</code>	55
A.5	Función <code>ccircunferencia.m.</code>	55
A.6	Función <code>ptangencia.m.</code>	56
A.7	Función <code>estacion_i.m.</code>	56
A.8	Función <code>giroi_ida.m.</code>	56
A.9	Función <code>giros_ida.m.</code>	57
A.10	Función <code>bombardear.m.</code>	57
A.11	Función <code>vuelta.m.</code>	57
A.12	Función <code>giros_vuelta.m.</code>	58
A.13	Función <code>giroi_vuelta.m.</code>	58
A.14	Función <code>estacion_v.m.</code>	58
A.15	Función <code>rotacion.m.</code>	59

Índice de figuras

2.1	Kettering Bug ^[1]	4
2.2	Radioplane OQ-2 ^[2]	4
2.3	General Atomics MQ-1 Predator ^[3]	5
2.4	3DR IRIS+ ^[4]	5
2.5	Lian Pin Koh y Serge Wich en Indonesia ^[5]	6
2.6	Pruebas del Proyecto People First ^[6]	7
2.7	Mapa de recurrencia de incendios en la Comunidad Valenciana ^[7]	8
2.8	Operaciones en VLOS, EVLOS y BVLOS ^[8]	11
3.1	Dispensador de sensores ^[9]	15
3.2	Escenario de actuación de un incendio forestal ^[9]	17
4.1	VALAQ 120 (RPAS) ^[10]	19
4.2	Bseed DROP ^[9]	19
4.3	Datos de la estación meteorológica de Cortes de Pallás. Dirección y velocidad del viento ^[11]	21
4.4	Datos de la estación meteorológica de Cortes de Pallás. Dirección y velocidad del viento ^[11] editado.	21
4.5	Datos de la estación meteorológica de Cortes de Pallás. Temperatura y humedad relativa ^[11]	22
4.6	Índice de Haines. Previsión para el día 28/06/2012 y siguientes ^[11]	23
4.7	Perímetro del incendio [Fuente: Google Earth].	24
4.8	Isócronas evolución del fuego ^[11]	24
4.9	Líneas de fuego para cada franja temporal [Fuente: Google Earth].	25

5.1	Arquitectura de las funciones del programa <code>ruta.m</code> . [Elaboración propia]	28
5.2	Caso general de ubicación de coordenadas [Fuente: Google Earth].	29
5.3	Esquema de la geometría del programa [Elaboración propia].	30
5.4	Esquema de la geometría del programa [Elaboración propia].	31
5.5	Diagrama de las funciones del programa <code>ruta.m</code> . [Elaboración propia] .	32
6.1	Ruta genérica representada [Fuente: Google Earth].	34
6.2	Gráficos de la distancia recorrida en cada vuelta de la ruta genérica. .	34
6.3	Ruta 1 representada [Fuente: Google Earth].	36
6.4	Gráficos de distancia y batería de la ruta 1.	37
6.5	Ruta 1 representada tras modificar la dirección [Fuente: Google Earth].	37
6.6	Gráficos de distancia y batería de la ruta 1 tras modificar la dirección. .	38
6.7	Ruta 2 representada [Fuente: Google Earth].	39
6.8	Gráficos de distancia y batería de la ruta 2.	40
6.9	Ruta 3 representada [Fuente: Google Earth].	41
6.10	Bombardeo de la ruta 3 representado [Fuente: Google Earth].	41
6.11	Gráficos de distancia y batería de la ruta 3.	42
6.12	Ruta 4 representada [Fuente: Google Earth].	43
6.13	Bombardeo de la ruta 4 representado [Fuente: Google Earth].	43
6.14	Gráficos de distancia y batería de la ruta 4.	44
6.15	Estación de Los Herreros y estación de Tous representadas [Fuente: Google Earth].	45
6.16	Ruta 4 representada tras cambiar la estación a Tous [Fuente: Google Earth].	45
6.17	Gráficos de distancia y batería de la ruta 4 tras cambiar la estación a Tous.	46
6.18	Ruta 5 representada [Fuente: Google Earth].	47
6.19	Bombardeo de la ruta 5 representado [Fuente: Google Earth].	47
6.20	Gráficos de distancia y batería de la ruta 5.	48

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Los incendios son uno de los grandes problemas ambientales a día de hoy. Estos pueden ser causados por actividad humana o por alguna causa natural, pero en cualquier caso suponen la desaparición de vegetación y el aumento de los niveles de contaminación en el aire.

Como ejemplo, en junio de 2012 ocurrió un incendio en la Comunidad Valenciana que, a pesar del esfuerzo realizado por extinguirlo, duró 8 días. Se trata del incendio de Cortes de Pallás dónde se quemaron más de 28 000 hectáreas^[12].

Tras estos incendios, los investigadores pertenecientes al Grupo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones contra el Cambio Climático (ICTvsCC) del Instituto de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (ITACA) han decidido crear un proyecto llamado ETHON en el cual se propone una solución para poder monitorizar incendios y así reducir los daños y extinguirlos en menor tiempo.

El objetivo es diseñar un dron que cuente con un dispensador de sensores terrestres, los cuales permitirán obtener información sobre el estado del terreno, con el fin de monitorizar, prevenir el avance y facilitar la extinción de incendios.

No obstante, el dron se encuentra en fase de desarrollo y, por tanto, carece de un sistema que calcule una ruta que realice el reparto de sensores atendiendo a las necesidades del grupo de bomberos de la forma más autónoma posible.

1.2 Objetivos del trabajo

El presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar una aplicación que genera la ruta a seguir por un dron que distribuirá sensores en el monte. Estos sensores se lanzan para ayudar en la prevención o extinción de incendios y tendrán una zona de interés en la que se quieren distribuir.

Otro objetivo del presente proyecto es, por tanto, extraer restricciones para la ruta del dron a partir de la definición de zona de interés. Para alcanzar este objetivo, se deberán estudiar las opciones de vuelo autónomo existentes así como las condiciones en las que las aeronaves podrán operar en los diferentes escenarios posibles. En este

apartado se hará un estudio exhaustivo de la legislación aplicable a cada escenario y las restricciones que dichas legislaciones añadirán.

La solución pretende ser un generador de rutas válido para cualquier situación. Para su evaluación, los resultados se particularizarán para el incendio que tuvo lugar en el municipio de Cortes de Pallás en el año 2012. Para ello, se consultará al colaborador del grupo ICTvsCC Dr. Raúl Quílez (técnico forestal del Consorcio de Bomberos de la Diputación de Valencia) y se seguirá el avance del frente según su criterio.

El programa deberá ser capaz de calcular una ruta que cumpla con los requisitos marcados por el gestor del incendio y, al mismo tiempo, tenga en cuenta las restricciones operacionales estudiadas como parte de los objetivos del trabajo. Además, computará los diferentes viajes que deberá realizar el dron, tanto por razones de autonomía como de capacidad de sensores.

Tras la introducción, en el capítulo 2 se explicará la evolución de los drones y la presencia que han tenido en los desastres medioambientales. También se tratará el tema de los incendios forestales en la Comunidad Valenciana y como pretende ayudar el proyecto ETHON en todo esto. Por último se realizará un estudio legislativo de la situación para saber a qué altitud tiene permitido volar la aeronave y conocer quién es el responsable del espacio aéreo en el momento del incendio.

El análisis del problema y del escenario, así como del protocolo de actuación se realizará en el capítulo 3.

El capítulo 4 contendrá, además del análisis del dron y de los sensores que participan en la operación, el estudio de las limitaciones de la aeronave que condicionarán el diseño de la solución: radio de giro, capacidad, autonomía, etc. En este apartado también se estudiará el incendio de Cortes de Pallás para determinar el área de aplicación del código.

A partir de las condiciones de vuelo, las restricciones y conociendo la tecnología que participará en la operación, en el capítulo 5 se procederá al diseño de un programa MATLAB que genere una ruta según los requerimientos, y posteriormente se probará con el área de aplicación estudiada.

Una vez obtenidos los resultados, en el capítulo 6, se evaluarán los beneficios de la implementación de esta tecnología en dicho incendio, así como en la extinción de incendios forestales.

Finalmente se extraerán las conclusiones de la totalidad del trabajo y se definirán posibles futuros trabajos que podrían complementar o trabajar junto al actual.

2. Estudio del estado del arte

Un dron es una aeronave no tripulada que puede ser controlada remotamente por un humano o incluir un sistema de pilotaje autónomo programado. En la última década se ha desarrollado muy rápidamente esta vertiente de aeronave sin tripulación. Este trabajo consiste en unir estas dos tecnologías para así poder obtener lo mejor de ambas partes y aplicarlo al ámbito de los incendios forestales.

A lo largo del capítulo, se da a conocer la situación actual de los drones autónomos. Además, se define la situación de los incendios forestales en la Comunidad Valenciana y por qué es importante la lucha contra los mismos, tanto en prevención como en extinción.

A continuación se relacionan ambos sectores y se profundiza en el proyecto del que es partícipe este trabajo. Una parte fundamental de este capítulo es el estudio legislativo realizado, enfocado a las diferentes situaciones que se podrían dar en la lucha contra incendios utilizando drones.

2.1 El dron a lo largo de la historia

La primera aeronave no tripulada de la historia fueron 200 globos aerostáticos del ejército austriaco que operaron en 1849 como bombas en la ciudad de Venecia. Pero no fue hasta 1898, cuando el inventor Nikola Tesla puso en funcionamiento el primer vehículo dirigido por radio control en un estanque en el Madison Square Garden^[13].

Unos años más tarde, en 1917, durante la Primera Guerra Mundial, apareció el Kettering Bug (Figura 2.1), un biplano capaz de apagar el motor tras haber recorrido una determinada distancia, la que había sido estimada que existía entre el punto de partida y el objetivo^[14]. Este biplano fue el precursor de muchas otras aeronaves no tripuladas utilizadas durante la Segunda Guerra Mundial.



Figura 2.1: Kettering Bug^[1].

En 1939 volaba por primera vez el que sería el primer dron fabricado en masa, el Radioplane OQ-2 (Figura 2.2). Esta aeronave norteamericana era pilotada por radio-control, y el propósito de su fabricación fue, como hasta entonces, de carácter bélico^[15].



Figura 2.2: Radioplane OQ-2^[2].

Durante las siguientes décadas, y mediante la financiación de importantes empresas de la aviación, como Boeing y Ryan, la tecnología de los UAVs avanzó a un ritmo vertiginoso, pues los ingenieros se percataron de que este tipo de aeronave era capaz de realizar giros y vuelos que un humano no sería capaz de soportar.

A principios del siglo XXI apareció el General Atomics MQ-1 Predator (Figura 2.3), un dron utilizado por los servicio de inteligencia de Estados Unidos en la guerra contra Afganistán, y el cual utilizaba cámaras y sensores para dar con el objetivo^[16].

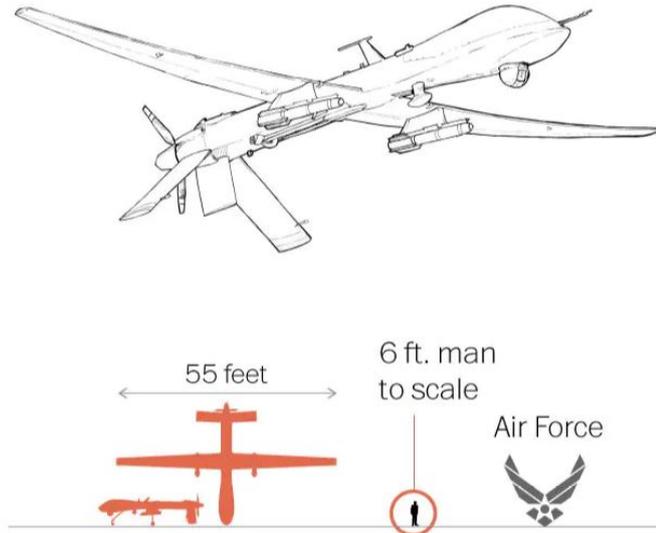


Figura 2.3: General Atomics MQ-1 Predator^[3].

En 2009 se funda la empresa 3D Robotics^[17], la cual empieza a comercializar vehículos aéreos no tripulados con una intención lúdica o con el fin de facilitar funciones dentro de algunas empresas. A diferencia de los anteriores, estos vehículos eran de menor tamaño y similares a lo que hoy en día entendemos por dron. El dron IRIS+ (Figura 2.4) es uno de los drones más famosos comercializados por la marca, y ha sido utilizado para la grabación de imágenes y vídeos desde el aire. Además, también cabe destacar que este nuevo concepto de UAV resulta asequible para algunas empresas interesadas en sus funcionalidades o incluso para usuarios particulares, tanto por su precio como por su facilidad de pilotaje.



Figura 2.4: 3DR IRIS+^[4].

A pesar de que el desarrollo de esta tecnología haya sido de carácter bélico en la mayoría de su trayectoria, actualmente se pueden encontrar un sinnúmero de utilidades para estas aeronaves, como el reparto de mercancía, la videovigilancia o incluso un aliado en la prevención y extinción de incendios, como es en el caso de este trabajo.

2.2 El papel del dron en los desastres medioambientales.

La teledetección basada en UAVs es una tecnología emergente que ha sido utilizada en una amplia gama de aplicaciones civiles y militares, incluyendo monitorización ambiental y del tráfico, agricultura de precisión o la gestión de desastres medioambientales. Esta última aplicación es una de las más importantes, ya que el sistema de drones hace posible una actuación rápida y de calidad que puede reducir a gran escala los efectos devastadores de los desastres medioambientales.

En 2005, tras la devastación del Huracán Katrina en Estados Unidos, se planteó la idea de utilizar helicópteros no tripulados para la obtención de imágenes de las zonas más afectadas. De esta forma se logró cuantificar parte de los daños sufridos de una manera menos costosa, lo que hizo que esta idea se desarrollara progresivamente.

Este método de documentar desastres resultó ser económica, rápida y segura, por lo que también se utilizó en otras situaciones como el terremoto de Haití en 2010 o el accidente nuclear de Fukushima en 2011.

Sin embargo, la presencia de vientos, obstáculos y otros inconvenientes para el vuelo autónomo de un helicóptero hicieron que la calidad de las imágenes no fuera la deseada, pero se pudo completar mediante imágenes proporcionadas por los satélites, las cuales resultan más costosas y tardan más tiempo en obtenerse.

En 2012, dos estudiantes de la Universidad de Zurich, Lian Pin Koh y Serge Wich^[5], construyeron un dron de bajo coste para poder obtener imágenes de zonas forestales. Su primera misión fue en los bosques de Indonesia, y tras más de 30 misiones exitosas descubrieron que de esta forma se podían obtener imágenes y vídeos de calidad para poder cartografiar zonas forestales de forma eficiente.



Figura 2.5: Lian Pin Koh y Serge Wich en Indonesia^[5].

A partir de este momento, empiezan a aparecer proyectos que no solo pretenden cartografiar una zona forestal, sino también quieren obtener información en tiempo real de un desastre natural.

Entre ellos encontramos proyectos como COMETS, proyecto financiado por la Unión Europea, y que consiste en una flota de drones pilotados por expertos que tratan de controlar los incendios^[18].

Otro proyecto que puede resultar interesante es el proyecto SURPRISE, también financiado por la Comisión Europea, el cual tiene grandes expectativas en materia de drones de vigilancia. En la documentación perteneciente a este proyecto ^[11] se habla de drones de vigilancia con múltiples funciones, aunque la vigilancia de incendios no es la única ni la principal función de estos.

A nivel España se encuentran también varios proyectos en desarrollo, como el proyecto impulsado por Telefónica y la Universidad Carlos III, llamado PeopleFirst^[6]. Este consiste en colocar sensores térmicos en las torres de comunicación para poder detectar focos calientes, y establecer estaciones base dónde se encuentre un dron que se desplace a dicho punto en caso de detección.



Figura 2.6: Pruebas del Proyecto People First ^[6].

Sin embargo, este trabajo nace a partir del proyecto ETHON, cuyo objetivo es proporcionar información a los expertos para que puedan predecir hacia dónde avanzará el fuego.

2.3 La problemática de los incendios forestales en la Comunidad Valenciana.

En pleno apogeo de una crisis climática, los incendios forestales son un tema clave a la hora de reducir la cantidad de CO₂ en el aire, puesto que un incendio forestal como el ocurrido en Pontevedra en 2006 emitió las misma cantidad de CO₂ que la emitida por 400 000 coches en un año [19].

Este trabajo se centrará en el estudio de los incendios ocurridos en la Comunidad Valenciana en los últimos años, pues las áreas mediterráneas poseen unas características que hacen de esta zona un lugar propenso a incendios. Las particularidades que hacen de las zonas forestales levantinas un lugar dónde encontrar fuegos son:

- Vegetación con resinas y especies con bajo contenido de agua.
- Vientos de poniente que durante la época estival producen un aumento en las temperaturas que ya de por sí son altas en la zona del mediterráneo debido a su clima seco.
- Escasez de precipitaciones que aportan una mayor sequedad a la vegetación de la zona.

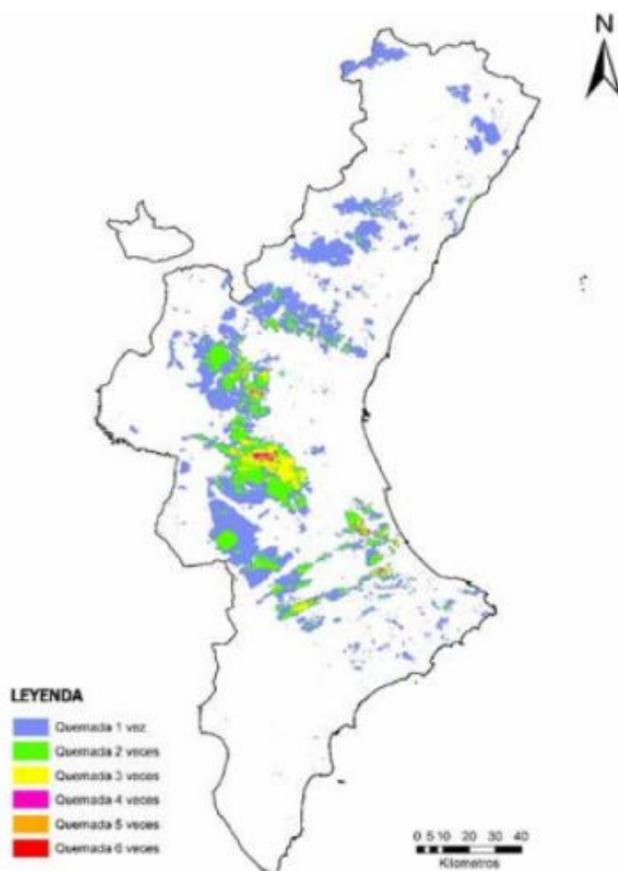


Figura 2.7: Mapa de recurrencia de incendios en la Comunidad Valenciana[7].

De la Figura 2.7 se puede extraer que en las zonas montañosas de la provincia de Valencia existe una alta probabilidad de que ocurran incendios, y que algunas zonas han sido afectadas hasta 6 veces por este tipo de catástrofe forestal. Este es un gran indicativo de que es necesaria una solución a este problema y una vigilancia exhaustiva de estas zonas.

Es por ello que actualmente existen muchos estudios y proyectos en desarrollo en la prevención, detección precoz y extinción de incendios forestales. Uno de ellos es el proyecto ETHON que se describirá a continuación.

2.4 El proyecto ETHON.

Como ya se ha mencionado, este trabajo responde a una necesidad real, dentro de un proyecto que aúna todos los puntos anteriores. Se trata del proyecto ETHON, un proyecto que está dividido en tres fases: integración, operativa y comercialización.

En este capítulo se explicarán estas fases para lograr comprender en que situación se encuentra el proyecto, a cuál de estas fases hace referencia nuestro trabajo.

2.4.1. Fases del proyecto ETHON

- Este trabajo corresponde a la fase de integración, de la cual es partícipe la UPV. Esta es la primera fase y consiste en el diseño y estudio de viabilidad de soluciones. Se podría decir que es la fase más abstracta.
- En la fase operativa participan las empresas UAV-Works y Pyro Fire Extinction, las cuales se han encargado de diseñar la aeronave y sensores, respectivamente. Esta fase será validada con ayuda de los bomberos y de la UME que trabajan conjuntamente con la UPV para obtener una solución a la gestión de los incendios forestales. También se contará con la presencia del grupo ETRA y la UCV para la validación de diseños.
- Por último, la fase de comercialización será la encargada de lanzar los resultados obtenidos al mercado, y poder utilizarlos en el ámbito de los incendios forestales.

La realización de este trabajo corresponde a la fase de integración, ya que trata el diseño de una solución para el vuelo autónomo de la aeronave. Sin embargo, las empresas relacionadas con la fase operativa trabajan paralelamente a la fase de integración para llevar a cabo el proyecto.

2.5 Estudio legislativo

Para poder avanzar en el estudio de los drones autónomos, se deberán conocer los diferentes tipos de operaciones disponibles actualmente, puesto que son las que están aceptadas por el gestor de navegación aérea en España (ENAIRE).

Estas aeronaves no tripuladas se pueden clasificar según diferentes factores como el peso, el uso que se le va a dar o el espacio aéreo dónde se va a volar. En cambio, el factor que resulta más importante para el desarrollo de este trabajo será según las características operacionales en las que se llevará a cabo el vuelo.

- VLOS (Visual Line Of Sight). Este tipo de operación asegura que, en todo momento, la aeronave se encontrará en la línea de visión del piloto. Esto facilita el pilotaje de la aeronave, así como asegura que el piloto conocerá en todo momento la posición de la misma. Es por ello por lo que no presenta grandes dificultades a la hora de obtener el permiso necesario para realizar un vuelo de estas características.
- BVLOS (Beyond Visual Line Of Sight). La aeronave puede desaparecer de la línea de visión del piloto, lo que puede acarrear situaciones complicadas si no se conoce exactamente la posición de este o la trayectoria que está llevando a cabo. Al tratarse de una situación crítica para la seguridad del espacio aéreo dónde se encuentra, este tipo de operaciones está muy limitadas y reguladas por AESA.
- EVLOS (Extended Visual Line Of Sight). A diferencia de una operación BVLOS, este tipo de operación permite que la aeronave salga del campo de visión del piloto, pero debe asegurar que en todo momento el piloto puede conocer su posición, mediante la comunicación por radio con otros operarios que sí pueden observarlo.

La Figura 2.8 ofrece un dibujo esquematizado de las diferentes situaciones de operación dependiendo de la visualización de la aeronave. El vuelo EVLOS, está considerado actualmente como un método mediante el cual, en algunos momentos, el piloto no es el que observa la aeronave, sino que son otras personas involucradas en la operación las que lo observan, y a su vez se comunican con el piloto. En cambio, en este capítulo, también se va a plantear otras formas de ampliar el campo de visión del piloto, como puede ser instalar cámaras en la aeronave para conocer el entorno y la situación en la que este se encuentra, que junto a un sistema de posicionamiento GPS, nos va a permitir conocer con bastante exactitud la localización de la aeronave en todo momento.

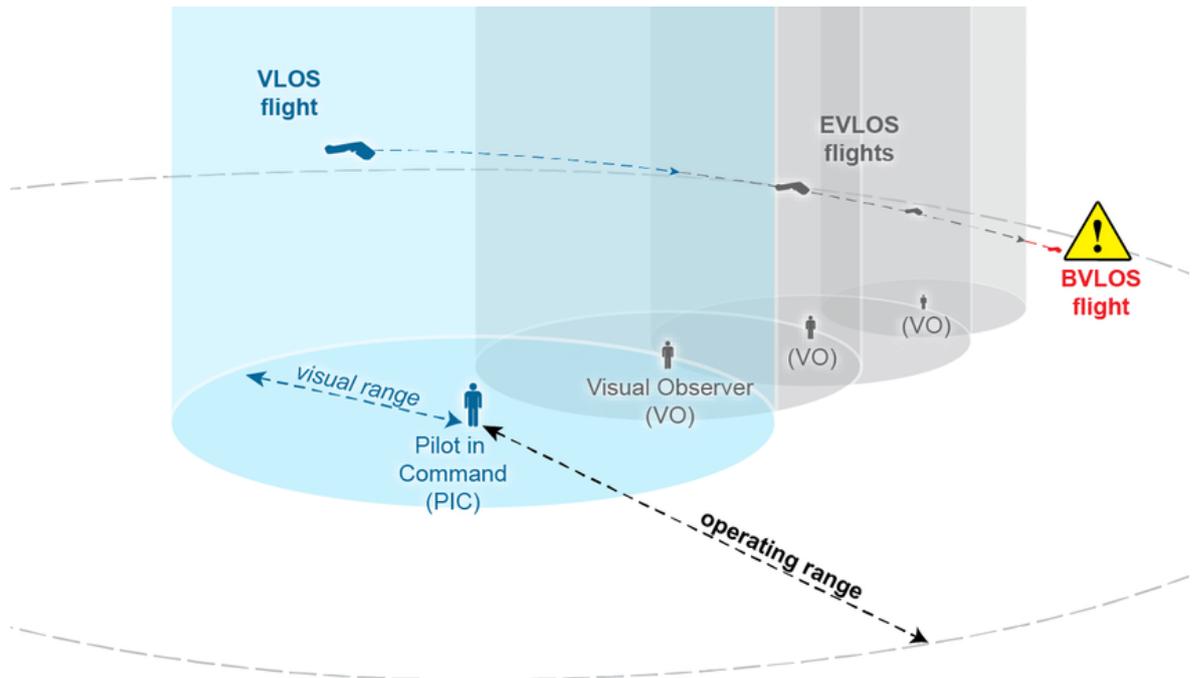


Figura 2.8: Operaciones en VLOS, EVLOS y BVLOS^[8].

Cabe destacar que, a pesar de que se trate de un dron de vuelo autónomo, este siempre deberá estar supervisado por alguien que se encuentre en posesión del título correspondiente, para así asegurar que, en caso de fallo del sistema, quien deberá encargarse de solucionar esta situación será alguien que conozca los protocolos de actuación.

Según el RD 1036/2017 la aeronave VALAQ 120 y todos los elementos que la rodean se clasifican como RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems), ya que tendrá un vuelo autónomo, pero este podrá ser intervenido en cualquier momento por un piloto certificado.

Además, también se tendrá en cuenta en todo momento que el vuelo se realiza fuera de edificaciones y personas y que el MTOM de la aeronave se encontrará por encima de los 2 kg, pero por debajo de los 25 kg.

Para lo que a la legislación respecta, se tendrán en cuenta tres situaciones diferentes, dependiendo de la misión de vuelo.

- **Pruebas de vuelo.** La primera situación será el caso de la realización de las pruebas de vuelo, es decir, un vuelo experimental. En esta ocasión la aeronave se encontrará siempre en la línea de visión del piloto, por lo que se considerará un vuelo VLOS.

Para ello se deberán cumplir los siguientes artículos del RD 1036/2017:

- Artículo 8: *Todas las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) deberán llevar fijada a su estructura una placa de identificación ignífuga.*

- Artículo 23.ter.3.b: *La operación debe realizarse fuera de la zona de tránsito de aeródromo y respetando las distancias mínimas establecidas en dicho Artículo.*
- Artículo 23.quáter: *Las aeronaves [...] deberán contar con los equipos requeridos para el vuelo en el espacio aéreo de que se trate conforme a las reglas del aire aplicables.*
- Artículo 26: *El operador de sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS), sin perjuicio del cumplimiento de cualquier otra obligación prevista en este real decreto, deberá cumplir con los requisitos indicados en el mismo artículo.*
- Artículo 30: *El operador deberá establecer un área de protección para el despegue y el aterrizaje [...] así como zonas de recuperación segura en el suelo de manera que [...] se pueda alcanzar una de ellas en cualquier momento sin riesgo de causar daños a terceras personas y bienes en el suelo.*
- Artículo 31: *Está prohibido llevar a bordo [...] objetos y sustancias que se enumeran en la lista de mercancías peligrosas [...] enumeradas en el Documento OACI 9284-AN/905.*
- Artículo 32: *El sobrevuelo [...] de instalaciones afectas a la defensa nacional o a la seguridad del Estado [...] sólo podrá realizarse con el permiso previo y expreso del responsable de la infraestructura.*

Las dos siguientes situaciones serán consideradas Operación aérea especializada pues, como indica en el Artículo 5 letra l), se trata de una “operación [...] en la que se utiliza una aeronave pilotada por control remoto (RPA) para realizar actividades especializadas, tales como, actividades de investigación y desarrollo, [...] lucha contra incendios, lucha contra la contaminación o prevención y control de emergencias.”

- **Extinción de incendios.** En el caso de que la aeronave esté operando para la extinción de incendios, se tendrá en cuenta el Artículo 44 del RD 1036/2017. Este Artículo establece que *en situaciones de riesgo si las autoridades públicas responsables de la gestión de tales situaciones requieren la colaboración de los operadores habilitados [...] para el ejercicio de operaciones aéreas especializadas, éstos podrán realizar vuelos que no se ajusten a las condiciones y limitaciones previstas en este real decreto.*

Además, en el “Plan Especial frente al riesgo de incendios forestales” de la GVA se establece que la persona que ostente la Dirección del PMA asume la máxima responsabilidad de dirección del incendio sobre el terreno. Esto quiere decir que esta persona será la encargada de permitir o no la entrada de la aeronave en la zona delimitada.

- **Prevención de incendios.** En el caso de que la aeronave esté operando para ayudar a la prevención de incendios, esta se situará en zonas de difícil acceso, ya que es el punto de interés de su utilización, por lo que se considerará un vuelo BVLOS.

Si la aeronave se encuentra realizando un análisis de la zona para conocer el estado de la misma y evaluar el riesgo de incendio, esta operación será premeditada por lo que, además de cumplir con los Artículos citados en el apartado de las pruebas de vuelo, también se deberá obtener una autorización de AESA y volar a una altura máxima de 120 m sobre el terreno o sobre el obstáculo más alto. En el caso de que el vuelo sea nocturno, se deberá volar en condiciones de vuelo visual y realizar, previamente, un estudio aeronáutico de seguridad.

Sin embargo, si en algún momento recibe un aviso de alarma y surge la necesidad inmediata de conocer la situación de la zona, se podrán aplicar el Artículo 44 del RD 1036/2017 y la aeronave podrá volar en las mismas condiciones que en el caso de la extinción de incendios.

3. Análisis del problema

En este apartado se realiza una definición exhaustiva del problema a resolver.

Para ello, se debe conocer el escenario en el cuál se pretende que actúe la aeronave. Se trata del control de un incendio, en el cuál se desea monitorizar la zona, conociendo la información de temperatura y humedad de ciertas zonas.

La actuación constará de dos convertiplanos, que no se diferenciarán por presentar una arquitectura diferente, ya que pueden incluso llegar a ser el mismo, sino por el carácter de su actuación. Estos dos personajes son el dron repetidor y el dron bombardero.

El primero en actuar, y el cuál es el protagonista de este trabajo, es el bombardero. La misión de este, una vez obtenidas las coordenadas de la estación y de la zona a analizar, será lanzar una serie de sensores para así poder tener un control de la temperatura y humedad de estas zonas.

Estos sensores se deberán lanzar a lo largo de lo que se ha denominado como “línea de fuego”. Esta estará definida por las coordenadas inicial y final de cada una de las rectas que la formen, y tendrán un sentido de lanzamiento cada una de ellas. La línea de fuego deberá ser elegida por el cuerpo de bomberos, quienes serán los encargados de transmitir esta información al programa.

Una vez el bombardero haya lanzado todos los sensores necesarios llegará el turno del repetidor. Este dron ha sido el objeto de estudio de otro Trabajo Final de Grado, realizado por Pilar Albadalejo Meca ^[20], y que consiste en recolectar todos los datos que los sensores puedan proporcionar, para que así los operarios del incendio puedan estudiar el estado del mismo.

Los nombres de dron bombardero y dron repetidor han sido una forma coloquial de poder diferenciarlos según su actuación. Sin embargo, en todo caso se tratará del modelo VALAQ 120 que será descrito dentro de los materiales.

Existen diferentes escenarios tipo que intervienen en la extinción o prevención de un incendio, y en cada uno de ellos presenta características diferentes.

Uno de ellos es el control de un incendio, dónde hay zonas de difícil acceso que pueden ser clave a la hora de controlar el incendio. Cuando se trate de una situación así, el cuerpo de bomberos decidirá que zona desea monitorizar y enviará la información al programa. A partir de este punto se decidirá si se quiere utilizar el mismo dron como

bombardero y repetidor, o si se desea utilizar dos drones. Todo esto dependerá del consumo de batería del lanzamiento de sensores.

En el caso de que se diseñe un dron para cada operación, la única diferencia estructural será el dispensador (Figura 3.1) que tendrá integrado el dron bombardero, ya que el aumento del peso en el dron repetidor supondrá una disminución de la autonomía innecesaria, puesto que este no necesitará lanzar sensores durante su recorrido.

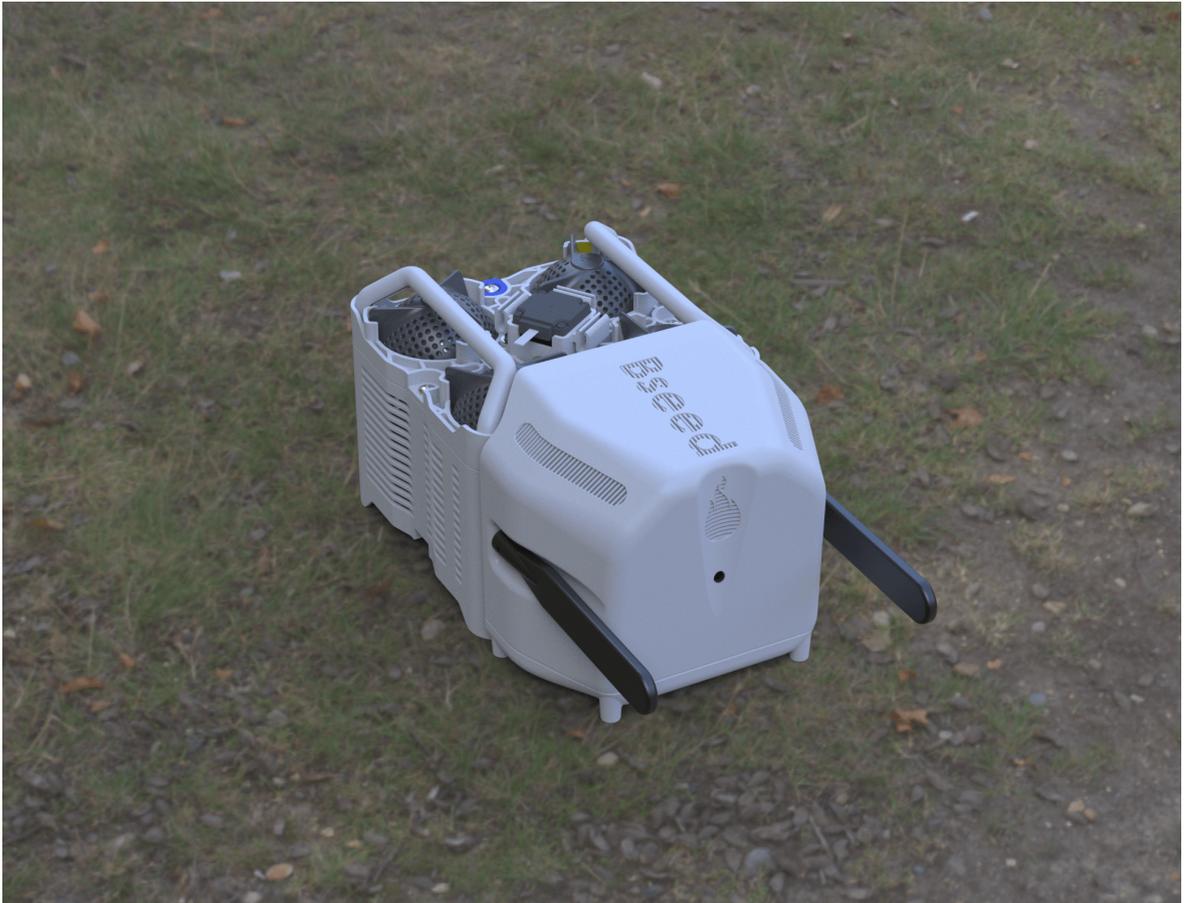


Figura 3.1: Dispensador de sensores[9].

Otro escenario tipo durante un incendio es el control nocturno, ya que los medios de extinción se retiran por la noche debido al riesgo que esto supone, tanto a nivel del peligro del personal que trabaja en ese momento, así como a nivel de eficiencia durante esas horas, ya que la escasez de luz no permite trabajar con el mismo rendimiento que se obtiene durante el día.

Durante el control nocturno, será más importante la diferenciación entre drones, puesto que el dron repetidor deberá trabajar durante toda la noche y realizando cambios de baterías frecuentes. En el caso del dron bombardero, este cubrirá las líneas de fuego que el cuerpo de bomberos considere antes de caer la noche, ya que es más fácil visualizar el incendio durante el día. En el caso de que fuera necesario, también se podrán realizar bombardeos durante la noche.

Otro escenario tipo son las actuaciones una vez se declara que el incendio está extinguido. En cualquier incendio forestal se encuentran zonas de difícil acceso, no solo porque el fuego impida acceder a estos sitios, sino que cuando se trata de lugares rocosos y montañosos puede ser peligroso transitar por ellos incluso en condiciones normales. Esto puede suponer un problema a la hora de declarar el fin del estado de emergencia, pues pueden existir puntos calientes que no se han detectado, ya sea por la sutileza de estos, o por el difícil acceso a las zonas en las que se encuentra.

Las ventajas que nuestro convertiplano ofrecerá a estas situaciones es el poder controlar esto sin tener que poner en riesgo a los profesionales que se encuentran operando en la zona.

Para poder proponer un diseño del código que se encargará de guiar al dron bombardero en su misión, primero se deberán establecer una serie de condiciones que deberán ser elegidas en función de las limitaciones estructurales de la aeronave y del estudio legislativo realizado en el apartado 2.5.

Otro punto importante para es conocer el protocolo de actuación, para así conseguir que el programa se ajuste a las necesidades de los profesionales.

El inicio de la actuación estará marcado por el bombero jefe o aquel operario del incendio que se encargue de la gestión de este. Este marcará las coordenadas tanto de la estación desde dónde saldrá el dron así como las líneas de fuego que desee cubrir.

A partir de este punto, el programa que ha sido diseñado calcula una ruta que cumpla con los requisitos marcados por el gestor del incendio y, al mismo tiempo, tenga en cuenta las restricciones citadas anteriormente. Esta ruta definirá también los diferentes viajes que deberá realizar el dron así como la dirección que se deberá tomar en cada línea de fuego. Estos factores están marcados por la autonomía y por la capacidad de sensores de la bodega del aeronave.

Una vez el resultado del programa sea transmitido al dron, este realizará la ruta para cubrir las zonas especificadas de sensores. Habiendo cumplido con su propósito, se dará paso al dron repetidor, que se encargará de recolectar los datos de los sensores ya lanzados para poder analizar la situación del incendio.

La Figura 3.2 representa el escenario del incendio tras el lanzamiento de los sensores, es decir, el escenario de actuación del dron repetidor.

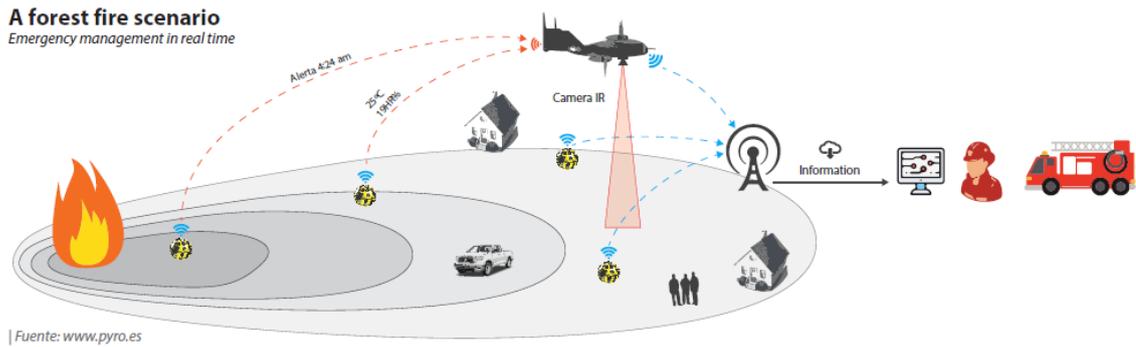


Figura 3.2: Escenario de actuación de un incendio forestal^[9].

Aunque este no sea el escenario a analizar en este trabajo, es importante conocer el escenario de actuación posterior, para así poder proponer una solución que facilite la actuación al dron repetidor.

Una vez analizado el problema, y teniendo claros los objetivos a cumplir, se puede proceder a diseñar una solución que cumpla con todos los requisitos de la ruta que el dron bombardero deberá seguir para así cumplir con su misión.

4. Materiales y métodos

4.1 Tecnologías del proyecto ETHON

Para cumplir con su objetivo, el proyecto ETHON cuenta con la ayuda de dos empresas: Pyro Fire Extinction y UAV Works. Estas son la encargadas de diseñar los sensores y el dron, respectivamente.

En el campo de la programación, se ha decidido utilizar el lenguaje MATLAB. A pesar de que existen lenguajes que compilan con mayor velocidad, MATLAB realiza cálculos numéricos numérico más complejos que facilitan la programación de ciertos cálculos necesarios para obtener una ruta más optimizada. Además, la interfaz es mucho más visual, lo que proporciona resultados mucho más gráficos de las rutas, las cuales se visualizarán en un mapa antes de poner en marcha el dron para poder valorar si el resultado es el deseado.

4.1.1. El convertiplano VALAQ 120

El proyecto ETHON se caracteriza por ser un proyecto innovador, en concreto por el concepto que ha tenido UAV-Works en diseñar un convertiplano que efectúe el despegue y aterrizaje en vertical mediante la sustentación proporcionada por el cambio de velocidad aparente en el ala fija.

Se trata de un convertiplano cuatrimotor llamado VALAQ 120 (Figura 4.1) Este posee una autonomía de 2 horas de vuelo y además tiene un sistema de posicionamiento que podría comunicarse a través de las constelaciones satelitales GPS, GLONASS o GALILEO para poder contar en todo momento con la posición de la aeronave y con la mayor exactitud posible.

Además de la cámara térmica, que permite una visión del incendio del espacio aéreo para su posterior estudio y conocimiento de la situación, también posee un dispensador de sensores. Este dispensador tiene capacidad para albergar 8 sensores Bseed, fabricados por la empresa Pyro Fire Extinction.

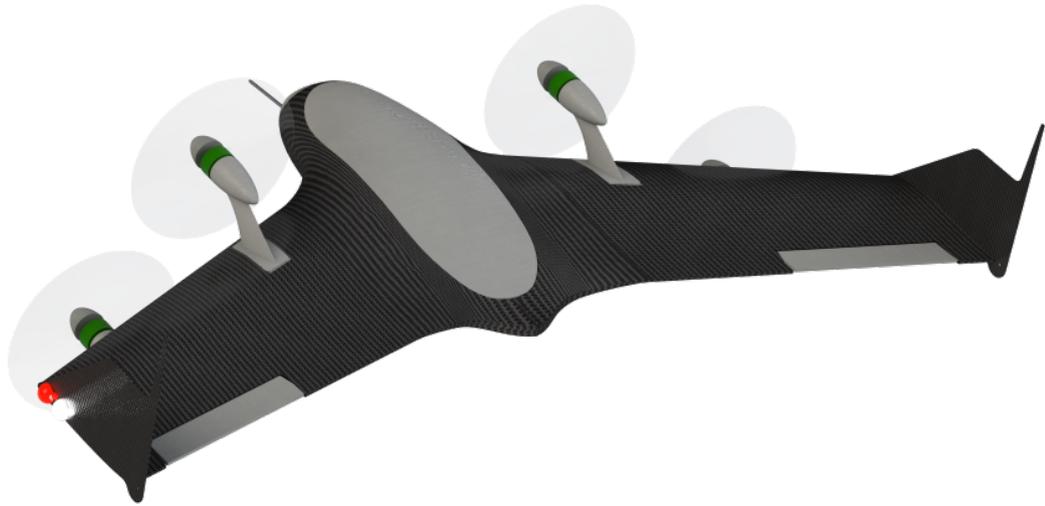


Figura 4.1: VALAQ 120 (RPAS)^[10].

4.1.2. Los sensores Bseed

Los sensores Bseed (Figura 4.2) poseen el tamaño de una pelota de tenis y pesan alrededor de 100 gramos. Estos están recubiertos de un material elástico que evitará que se rompa tras una caída desde una altura considerable. La funcionalidad de estos será obtener datos sobre la temperatura, humedad y niveles de CO_2 en el lugar dónde sea lanzado, para así poder conocer la situación del terreno. La autonomía será de unos 10 días con una frecuencia de muestreo de 8 segundos, lo que debería ser suficiente, ya que se desea que a los 10 días el fuego ya esté extinguido o, en caso contrario, este habrá tomado un rumbo diferente, que se espera que sea conocido.



Figura 4.2: Bseed DROP^[9].

4.2 Condiciones de vuelo

El vuelo de la aeronave VALAQ 120 va estar condicionado, tanto por el diseño de la misma como por la legislación descrita en el capítulo 2.5.

Las limitaciones estructurales limitan tanto el radio de giro de la aeronave a la hora de seguir una ruta, así como la autonomía y la máxima resistencia al viento. Sin embargo, el tipo de operación, la altura de vuelo y la velocidad están limitadas por la legislación.

Las condiciones de vuelo se encuentran resumidas en la Tabla 4.1.

Radio de giro	150 m
Velocidad del convertiplano	50 km/h
Autonomía	1 h (carga máxima) 2 h (sin carga)
Resistencia al viento	30 km/h
Altura de vuelo	Hasta 120 m
Tipo de operación	BVLOS

Tabla 4.1: Condiciones de vuelo.

Cabe destacar que las condiciones de la Tabla 4.1 son válidas para operaciones de área especializadas descritas en el Artículo 5 letra l). En el caso de este trabajo, se puede operar con estas condiciones tanto para la prevención como para la extinción de un incendio.

Además de estas condiciones, que son válidas tanto para el dron bombardero como para el repetidor, hay otros parámetros exclusivos para la función de lanzamiento de sensores. Se trata de la capacidad de la bodega, que será de 8 sensores, así como de la distancia entre sensores, que generalmente será de 500 metros, aunque podría cambiarse en caso de ser necesario.

4.3 Área de aplicación

Con el fin de concretizar un caso de emergencia forestal, se va a proceder a analizar el incendio ocurrido en Cortes de Pallás en 2012. Para ello, además de estudiar lo ocurrido, se determinará en qué situaciones podría haber intervenido el sistema de gestión de incendios diseñado por ETHON, y en que situaciones no habría sido posible actuar debido a sus limitaciones. Para ello se discernirá en qué casos la intervención del sistema de gestión de incendios diseñado por ETHON habrá sido determinante.

La restricción que será más determinante a la hora de decidir si el dron podrá volar será el viento. Para ello se ha analizado la Figura 4.3 del informe post-incendio.

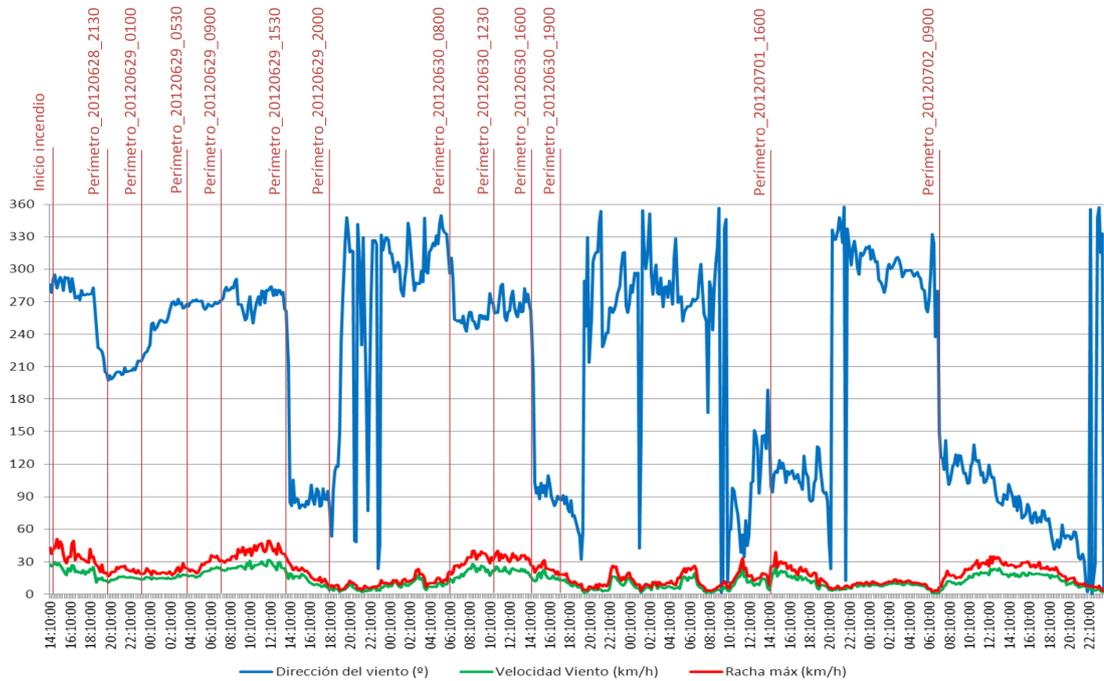


Figura 4.3: Datos de la estación meteorológica de Cortes de Pallás. Dirección y velocidad del viento^[11]

En la Figura 4.4 se ha editado la Figura 4.3 para poder analizarla más fácilmente. De ella se pueden obtener las franjas horarias en las cuales las rechas de viento máximas eran inferiores a 30 km/h, por lo que el dron podría actuar.

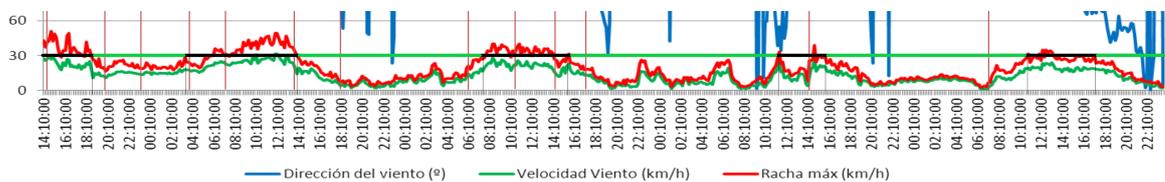


Figura 4.4: Datos de la estación meteorológica de Cortes de Pallás. Dirección y velocidad del viento ^[11] editado.

Tras el análisis de los vientos y los tiempos, se han detectado 5 franjas horarias en las que el dron no tendría que haber sufrido una resistencia al viento mayor de la que es capaz. Las franjas que se detallan en la Tabla 4.2 se estudiarán en la Figura 4.5 para saber las condiciones climatológicas que se habrían detectado en cada momento.

Franja	Inicio	Fin	Duración [horas]
Franja 1	28-6-12 18:00	29-6-12 2:00	8
Franja 2	29-6-12 14:00	30-6-12 6:00	16
Franja 3	30-6-12 16:00	1-7-12 11:00	19
Franja 4	1-7-12 16:00	2-7-12 10:00	18
Franja 5	2-7-12 17:00	2-7-12 22:00	5

Tabla 4.2: Franjas horarias con vientos inferiores a 30 km/h.

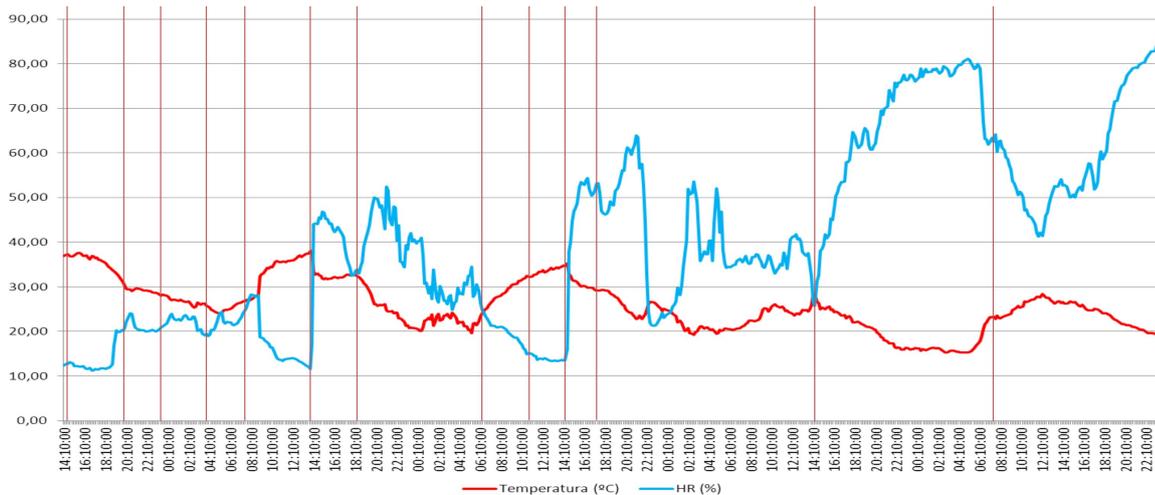


Figura 4.5: Datos de la estación meteorológica de Cortes de Pallás. Temperatura y humedad relativa^[11].

Durante la primera franja horaria las temperaturas no bajan de 25°C y la humedad relativa se encuentra entre el 20 y el 25 %. Estas condiciones favorecen la propagación del incendio, que ya se inició con temperaturas muy altas y un viento extremadamente seco de poniente.

A lo largo del día 29 la temperatura disminuirá progresivamente desde casi 40°C con los que se empieza el día hasta llegar a los 20°C. La humedad relativa irá cambiando, no superando el 30 % al final del día y llegando a bajar del 20 % durante la madrugada.

El día 30 empieza con viento de poniente, por lo que no será hasta las 2.00 p.m. cuando suba la humedad relativa. Durante esta hora se produce una subida brusca que hace pasar de una humedad del 15 % a casi el 60 %. Esta humedad ayudará a reducir la propagación del incendio. La temperatura disminuirá a lo largo de la tarde, manteniendo los 20°C hasta la mañana del día siguiente.

Durante la tarde del día 1 la humedad aumentará, llegando a valores de hasta el 80 % durante la madrugada del día 2, y manteniendo la temperatura en 15°C.

Finalmente, el último día de incendio se sobrepasará el 85 % de humedad relativa a pesar de que las temperaturas se sitúen por encima de los 20°C.

Cabe tener en cuenta que algunos de los incrementos y disminuciones de temperatura y humedad son debidos a las horas del día, ya que durante la noche las temperaturas caen y la humedad relativa se incrementa.

Sin embargo, las variaciones más significativas son debidas a los vientos de levante y poniente. El viento de poniente, al tener un carácter tan seco, ayudará a la propagación del incendio. Por otra parte, el viento de levante creará un ambiente más húmedo que ayudará a reducir esta propagación.

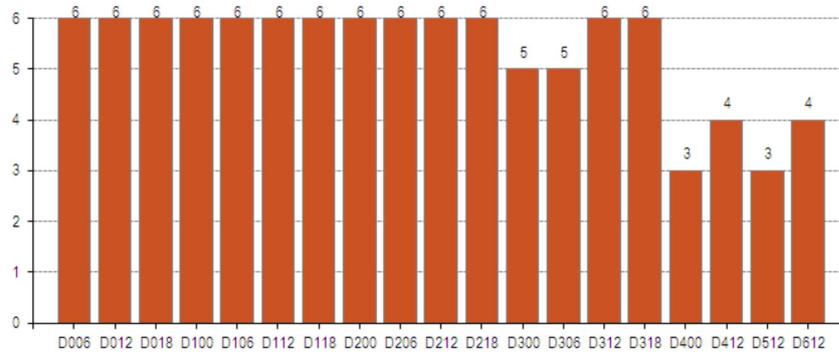


Figura 4.6: Índice de Haines. Previsión para el día 28/06/2012 y siguientes^[11].

El índice de Haines expresa, según las condiciones meteorológicas, la probabilidad de propagación de un incendio forestal. En la Figura 4.6, encontramos los valores de este índice por días. Podemos observar que a partir del día 4 de incendio, es decir, a partir del día 1 de julio, este índice disminuye significativamente. Esto toma sentido si se compara con los datos de la Figura 4.5, dónde a partir del 1 de julio se contemplan temperaturas más bajas y humedad relativa mucho mayor a la de los días anteriores.

El estudio realizado permite concretar en qué condiciones y en que zonas se probará la eficacia del código que se desea diseñar.

Gracias al Visor Cartográfico de la Comunidad Valenciana se ha podido obtener un mapa del incendio, y trasladarlo a la aplicación de Google Earth para así poder diseñar las rutas desde este. En la Figura 4.7 se puede observar el perímetro que quedó incendiado en 2012.

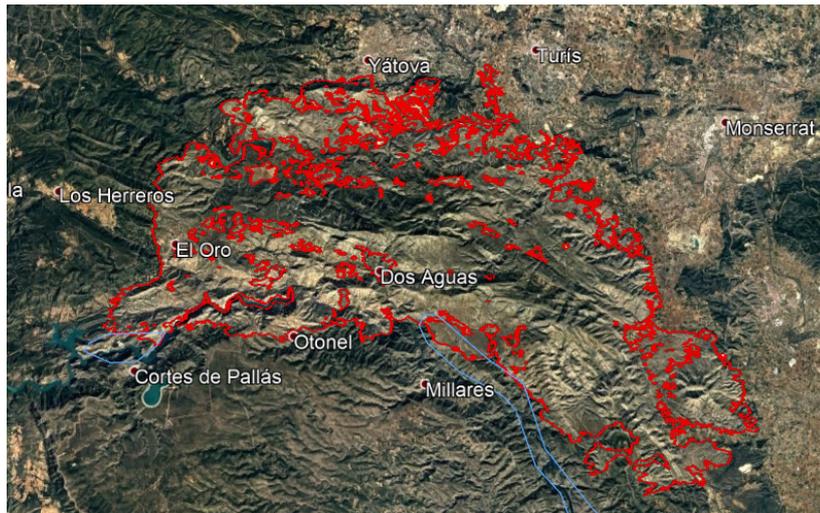


Figura 4.7: Perímetro del incendio [Fuente: Google Earth].

Inicialmente, la estación base se ubicará en Los Herreros, coordenadas que se encuentran fuera de la zona incendiada y cerca del inicio del mismo. Sin embargo, esta estación base podría cambiar en caso de que fuera necesario, ya que, dependiendo del desarrollo del incendio, puede que quede lejos de la zona que se quiera sensorizar.

Con la ayuda de la herramienta de superposición de imágenes y a la Figura 4.8 ha sido fácil determinar la cantidad de terreno incendiado en cada una de las franjas que se han clasificado en la Tabla 4.2. Los diferentes colores que subrayan la leyenda de la Figura 4.8 representan cada una de las franjas temporales.

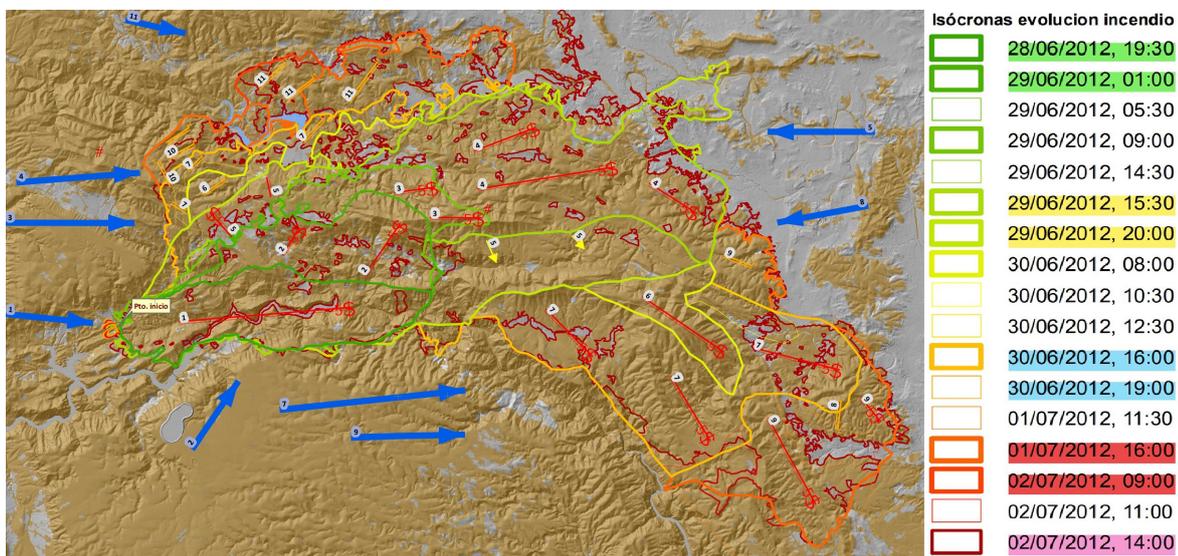


Figura 4.8: Isócronas evolución del fuego [11].

A partir de lo obtenido, se han elegido líneas de fuego, que son totalmente aleatorias y que no tienen relación con las que podría haber decidido un experto en la materia. Las líneas de fuego elegidas son las que se pueden observar en la Figura 4.9, donde el color de cada una de ellas corresponde con el elegido para diferenciar las franjas en la

Figura 4.8. La única condición que se ha utilizado para seleccionarlas es que deben estar localizadas dentro de la zona por la que supuestamente pasó el fuego en el momento en que se dan las condiciones climatológicas de cada franja.

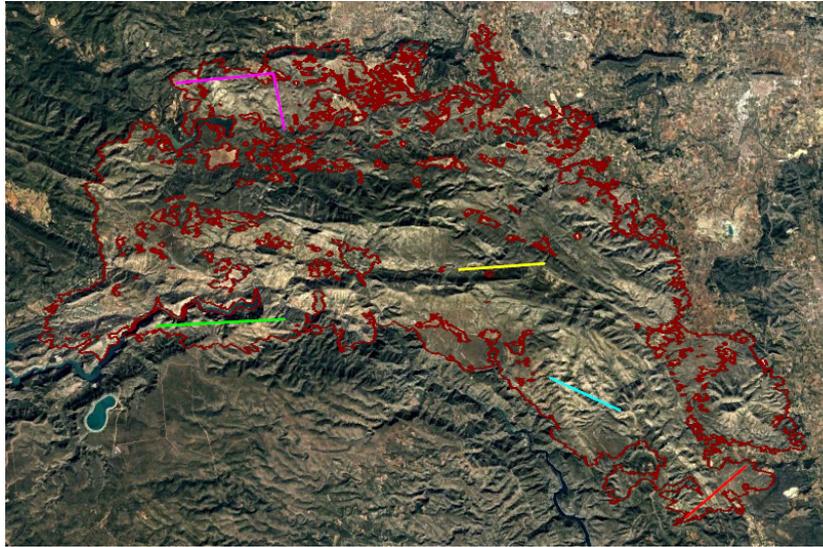


Figura 4.9: Líneas de fuego para cada franja temporal [Fuente: Google Earth].

Cabe destacar que a la hora de diseñar las líneas de fuego se ha tenido en cuenta diferentes ubicaciones, direcciones y distancias a la estación, para así poder tener una mayor diversidad de los datos y obtener diferentes resultados y comprobar que el programa es capaz de diseñar la ruta correspondiente para cada caso.

5. Diseño del código

Para poder monitorizar el lanzamiento de sensores se ha propuesto una solución mediante la programación en MATLAB. Para ello, se han utilizado una serie de funciones que, mediante la unión de estas se ha diseñado el programa `ruta.m`.

5.1 Programa principal

La estructura de este programa consiste en obtener las coordenadas de la estación y el tramo a cubrir mediante sensores a través de dos archivos `.kml`, que previamente han sido obtenidos mediante la aplicación de Google Earth, donde también se podrá visualizar el resultado final del programa. Además, se deberán establecer los parámetros de distancia entre sensores y el radio de giro de la aeronave así como su capacidad de transporte de sensores y la distancia que se desea que haya entre ellos.

```
1 addpath(' ../lib/geo ', ' ../lib/kml ', ' ../archivoskml ');
2
3 [point] = routekml_read ('Ruta Cortes de Pallas.kml ');
4 [est] = routekml_read ('Estacion los herreros.kml ');
5
6
7 late=est.wp.lat;
8 lone=est.wp.lon;
9
10 %% Distancia entre sensores (leg distance)
11 d=500;
12
13 %% Radio de giro
14 r=150;
15
16 %% Capacidad de sensores en el dron
17 cap=8;
```

Una vez introducidos estos datos, se deberán extraer los puntos inicial y final a bombardear de la ruta. Con esta información, un bucle será el encargado de calcular todos los puntos de paso del dron, así como la posición dónde se lanzará cada uno de los sensores. Dentro de este bucle, encontramos la función `lanzamiento`, que tiene como entradas las latitudes y longitudes de la estación y de los puntos inicial y final

de la trayectoria, así como la capacidad del dron, la distancia entre sensores y el radio de giro.

```
1 lati=point.wp(1).lat;  
2 loni=point.wp(1).lon;  
3 latf=point.wp(2).lat;  
4 lonf=point.wp(2).lon;  
5 [wp.num, wp_sens.num] = lanzamiento (late, lone, lati, loni, latf,  
    lonf, cap, d, r);
```

Mediante la función básica `orto_distazi` se calculará la distancia entre los puntos inicial y final, para así poder obtener el número de sensores que serán necesarios para cubrir toda la ruta, y los viajes según la capacidad de la aeronave. Cabe destacar que, en caso de que se tenga que realizar un viaje para el lanzamiento de un solo sensor, este no se realizará, puesto que será demasiado costoso para los resultados que proporciona un solo sensor.

La última tarea que deberá realizar el programa `ruta.m` será, mediante las funciones básicas de la librería KML, representar el resultado de los cálculos en Google Earth, para poder visualizar de una manera más intuitiva el resultado obtenido.

```
1 kmlwrite_polyline(wp.num, ['bombardeo.kml'], attr1);  
2 kmlwrite_polyline(wp_sens.num, ['sensores.kml'], attr2);
```

5.2 Funciones

El programa `ruta.m` está estructurado mediante funciones que han sido creadas u obtenidas de otras librerías para así realizar los cálculos deseados. La Figura 5.1 representa el esquema con todas las funciones que han sido diseñadas durante la realización del programa.

En esta sección se detallarán las características de cada función, incluyendo sus entradas y salidas.

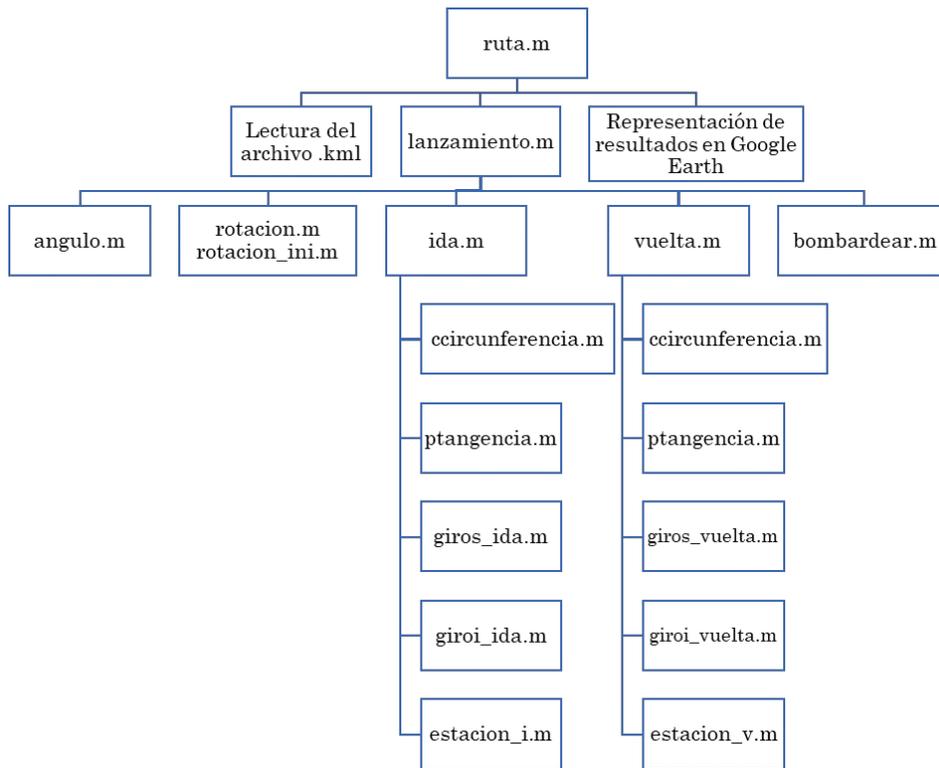


Figura 5.1: Arquitectura de las funciones del programa `ruta.m`. [Elaboración propia]

La función `lanzamiento.m` (Tabla A.1) que encontramos explícitamente en el programa calcula la distancia entre los puntos inicial y final, mediante la función básica `orto.distazi`. De esta forma, la función calcula el número de viajes que serán necesarios para cubrir la línea marcada.

Con la ayuda de la función `angulo.m` (Tabla A.2) se determina el ángulo que existe entre un vector y el norte, considerando la estación el centro del eje de coordenadas, la dirección N-S el eje de ordenadas y la dirección E-O el eje de abscisas. Este vector será el formado por la estación y el punto medio de la línea creada al unir el primer sensor y el último.

El propósito de obtener el ángulo alpha es poder simplificar la geometría y, por consiguiente, simplificar el cálculo dentro de las funciones. El caso que se ha tenido en cuenta es el de la Figura 5.2, dónde las coordenadas del primer sensor se encuentran en el segundo cuadrante, y las del último, en el primero.



Figura 5.2: Caso general de ubicación de coordenadas [Fuente: Google Earth].

Gracias a la función `rotacion_ini.m` (Tabla A.3) podremos girar las coordenadas para que, en el caso de que no sea así, las coordenadas queden en una estructura similar a la Figura 5.2.

A partir de este punto el programa entra dentro de un bucle, el cuál se ejecutará tantas veces como viajes se deban hacer, a menos que en el último viaje solamente se vaya a transportar un sensor, pues se ha considerado que esta operación no resulta eficaz en cuanto a autonomía y mejora de resultados. Dentro del bucle se ejecutarán otras tres funciones: `ida.m`, `bombardear.m` y `vuelta.m`.

La función `ida.m` será la primera en ejecutarse, la cuál corresponde a la Tabla A.4 y la cuál posee complejidad al contener a otras funciones secundarias.

Para poder comprender el funcionamiento de la función `ida.m`, primero se deberá comprender el esquema geométrico que se ha seguido para determinar los cálculos necesarios.

Los arcos de circunferencia representados en la Figura 5.3 hacen referencia al radio de giro de la aeronave. En primer lugar se calculará el centro de esta circunferencia, la cuál es la intersección de la perpendicular a la línea que forman el punto inicial y final, y que pasa por el punto inicial, a una distancia de valor del radio de giro. Este procedimiento es calculado numéricamente en la función `ccircunferencia.m` (Tabla A.5).

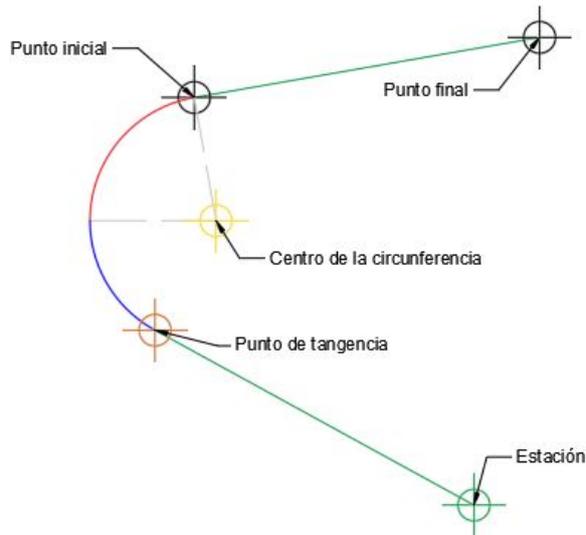


Figura 5.3: Esquema de la geometría del programa [Elaboración propia].

Con las coordenadas cartesianas del centro de la circunferencia se calculará, mediante la función `ptangencia.m` (Tabla A.6), el punto tangente a la circunferencia del radio de giro.

Una vez han sido obtenidos estas coordenadas, la matriz que representará el camino de la estación hasta el punto de tangencia será el resultado de la función `estacion_i.m` (Tabla A.7). La matriz que contendrá los puntos de paso del arco de circunferencia marcarán la trayectoria del dron para que pueda seguir la ruta correctamente, atendiendo a sus limitaciones. Este arco está formado por un arco inferior (arco azul en la Figura 5.3), cuyos puntos de paso se calcularán con la función `giroi_ida.m` (Tabla A.8), y otro arco superior (arco rojo) dibujado gracias a la función `giros_ida.m` (Tabla A.9).

La función más simple es `bombardear.m`, pues gracias a las funciones `orto_distazi` y `orto_reckon` solamente deberá situar un número de puntos, que será el número de sensores que deberán ser lanzados, a una distancia y en una dirección determinada entre las coordenadas inicial y final.

La última función dentro del bucle que encontramos en la función `lanzamiento.m` es la función `vuelta.m`. Esta es muy similar a la función `ida.m`, sin embargo poseen algunas diferencias relativas a la geometría y dirección.

La Figura 5.4 se podría decir que es un reflejo de la Figura 5.3, en cambio es útil para comprender el orden en que se ejecutarán las funciones en este caso.

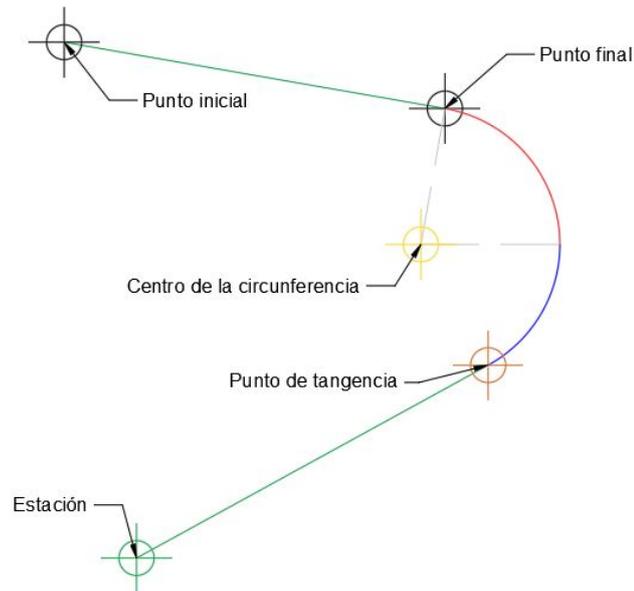


Figura 5.4: Esquema de la geometría del programa [Elaboración propia].

La función `giros_vuelta.m` (Tabla A.9) que forma parte de la función `vuelta.m` será la encargada de calcular la matriz de puntos de paso que definen el arco rojo representado en la Figura 5.4. A partir del último punto de la matriz obtenida, y hasta el punto de tangencia calculado, del mismo modo que en caso de la ida, la función `giro_vuelta.m` (Tabla A.13) calculará la matriz de los puntos que forman el arco azul. Una vez dibujado el arco, solo faltará trazar una línea entre el punto de tangencia y la estación para completar el recorrido que deberá realizar el dron.

Por último, con la función `rotacion.m` (Tabla A.15) giraremos de nuevo las coordenadas, junto a los nuevos puntos de paso calculados, para que vuelva a la posición original.

Juntamente con el esquema de la arquitectura de las funciones (Figura 5.1) y con la posterior explicación de las mismas, se ha diseñado un diagrama (Figura 5.5) para facilitar la comprensión del programa. Más allá de representar el diagrama de flujo, el esquema pretende secuenciar el orden de ejecución de las funciones para poder entender el funcionamiento de la función `ruta.m`. Cualquier duda que pueda surgir o detalle que se quiera conocer, se deberá acudir a la misma sintaxis del programa.

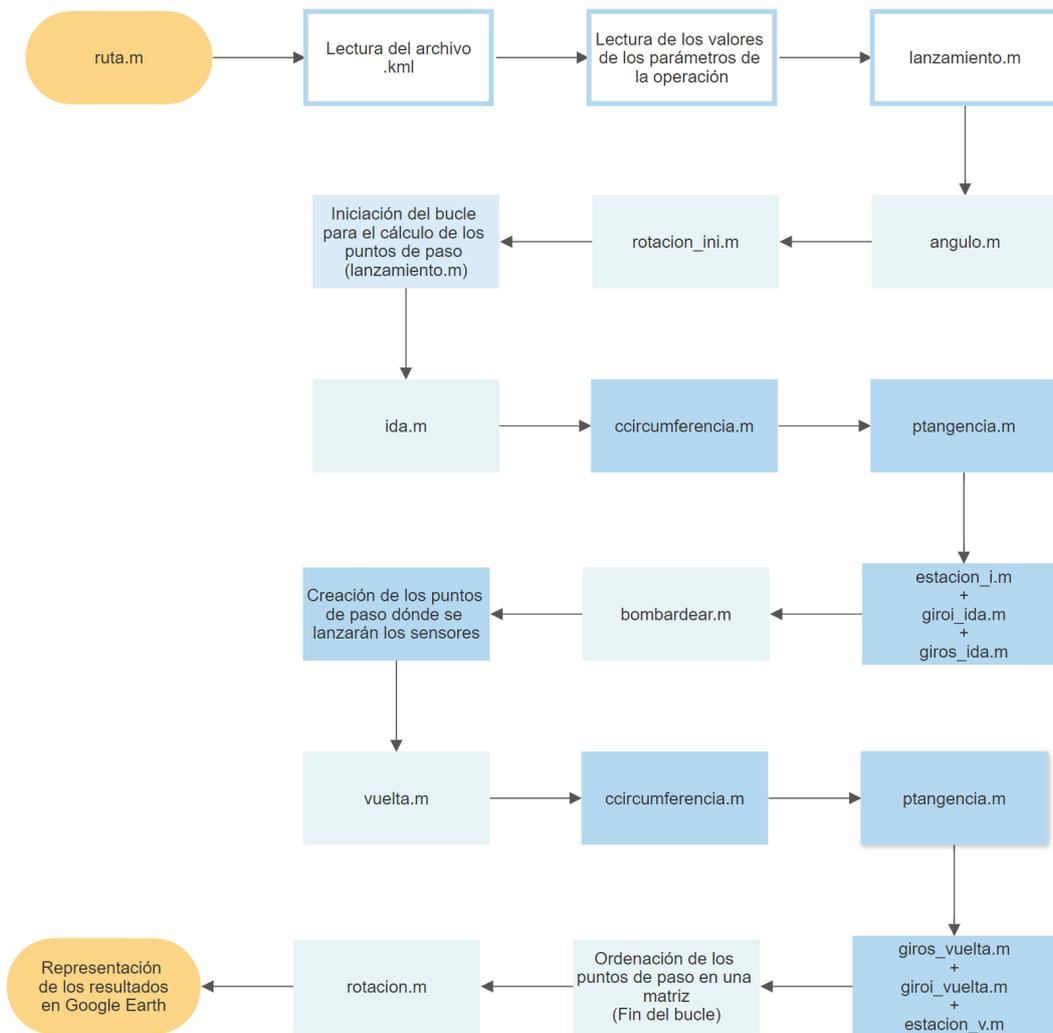


Figura 5.5: Diagrama de las funciones del programa `ruta.m`. [Elaboración propia]

6. Resultados

Tras la realización del diseño del código del programa, se va a proceder a analizar los resultados generados y, además, estudiar cómo puede beneficiar en la situación del incendio de Cortes de Pallás.

Para ello se estudiarán dos factores, el comportamiento del código en cada ruta y la gestión de la autonomía del dron.

En cada caso se ejecutará el programa con unas condiciones determinadas y a continuación se calculará la autonomía y los kilómetros recorridos con la ayuda de la herramientas Google Earth y Excel. A partir de los datos obtenidos se decidirá si es necesario ejecutar de nuevo el programa con nuevas condiciones para obtener mejores resultados de la ruta o si los valores obtenidos inicialmente han sido óptimos.

Las condiciones del punto 4.2 serán las utilizadas inicialmente en todos los casos de estudio de este apartado, ya que el modelo de dron no se cambiará en ningún caso, pues el objetivo del trabajo es diseñar una ruta para un dron en concreto. Sin embargo, algunas de estas se podrán modificar, dentro de lo posible para mejorar la eficiencia o operabilidad de la aeronave.

Estos casos de estudio van a ser seis: una ruta genérica seguida de los cinco casos obtenidos en el apartado 4.3. La ruta genérica ha sido aquella a partir de la cual se ha diseñado el código, por lo que se ha considerado relevante analizar su resultado.

6.1 Ruta genérica

En primer lugar, hay que analizar los resultados de la Figura 6.1, la cuál es el resultado de introducir las coordenadas de la estación de los Herreros en el programa, y una línea de fuego genérica que va desde el primer sensor (empezando por la izquierda) hasta el último.



Figura 6.1: Ruta genérica representada [Fuente: Google Earth].

Gracias a la herramienta de Google Earth, se pueden calcular fácilmente las distancias de la Figura 6.1. En ella, se ha marcado cuál será, supuestamente, el primer sensor en ser lanzado y el último, para así saber la distancia que en cada momento recorrerá con carga máxima, sin carga o estará bombardeando sensores. Todos estos datos quedan recogidos en la Tabla 6.1, y en la Figura 6.2 se puede observar el porcentaje de recorrido que se realiza en cada modo.

	Vuelta 1		Vuelta 2		Total	
	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)
Carga máxima	15,4	30,8	11,4	22,8	26,8	53,6
Bombardeo	3,5	7	2,8	5,6	6,3	12,6
Sin carga	11,4	11,4	8,1	8,1	19,5	19,5

Tabla 6.1: Distancia y batería de la ruta genérica.



Figura 6.2: Gráficos de la distancia recorrida en cada vuelta de la ruta genérica.

Lo importante en este punto es calcular la autonomía que tendrá el dron, para así conocer si este será capaz de realizar el recorrido establecido con la autonomía que posee su batería, y en el caso de que así sea, una vez terminada su función, si deberá realizarse un cambio de batería o no para poder dar paso al dron repetidor.

Según las especificaciones del dron, este posee una autonomía de 2 horas cuando se vuela sin carga, y de 1 hora cuando el dron tenga la bodega llena de sensores, y con

estos datos es con los que se ha obtenido la columna de consumo de batería de la Tabla 6.1. Para el caso del bombardeo, se ha considerado el mismo gasto de batería que en el caso de carga máxima, pues cada vez que se lance uno de estos sensores, el peso de la aeronave cambiará y deberá reestabilizarse, consumiendo energía para conseguirlo.

Todo esto nos indica, junto a la Figura 6.2, que la ruta a realizar no es la más óptima por lo que a autonomía se refiere, por lo que habrá que cambiar la ruta, y el lanzamiento de sensores deberá ser en sentido contrario.

	Vuelta 1		Vuelta 2		Total	
	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)
Carga máxima	11,4	22,8	8,1	16,2	19,5	39
Bombardeo	3,5	7	2,8	5,6	6,3	12,6
Sin carga	15,4	11,4	11,4	11,4	22,8	22,8

Tabla 6.2: Distancia y batería de la ruta genérica con la eficiencia mejorada.

Considerando que el lanzamiento de sensores es en sentido opuesto al establecido en la Figura 6.1, la tabla de distancias y autonomía queda como en la Tabla 6.2. Esto significa pasar de un 85,7 % de consumo de la batería a un 74,4 %. Mediante la segunda ruta, conseguimos llegar a la estación con más del 20 % restante de batería, lo que es un margen suficiente para considerar que la ruta se puede realizar con tranquilidad. Este margen es considerado para que ante cualquier imprevisto la aeronave no se quede a mitad de camino, sin opción de volver a la base o de aterrizar en algún lugar seguro. Además, en el caso de un incendio, pueden encontrarse rachas de viento que dificulten el vuelo del dron y que provoquen el aumento en el consumo de este.

Siguiendo la metodología que se ha utilizado para analizar los resultados de la ruta genérica anterior, se van a analizar los escenarios que se podrían haber dado con las 5 rutas seleccionadas en el punto 4.3.

6.2 Ruta 1: dos viajes con diferente carga

La primera ruta que corresponde a un recorrido dentro del perímetro del incendio de 2012 es el representado por la Figura 6.7. Para cubrir de sensores toda la ruta se tendrán que lanzar 11 sensores, por lo que serán necesarios 2 viajes: uno con la bodega llena, y otro en el que solo será necesario transportar 3 sensores.

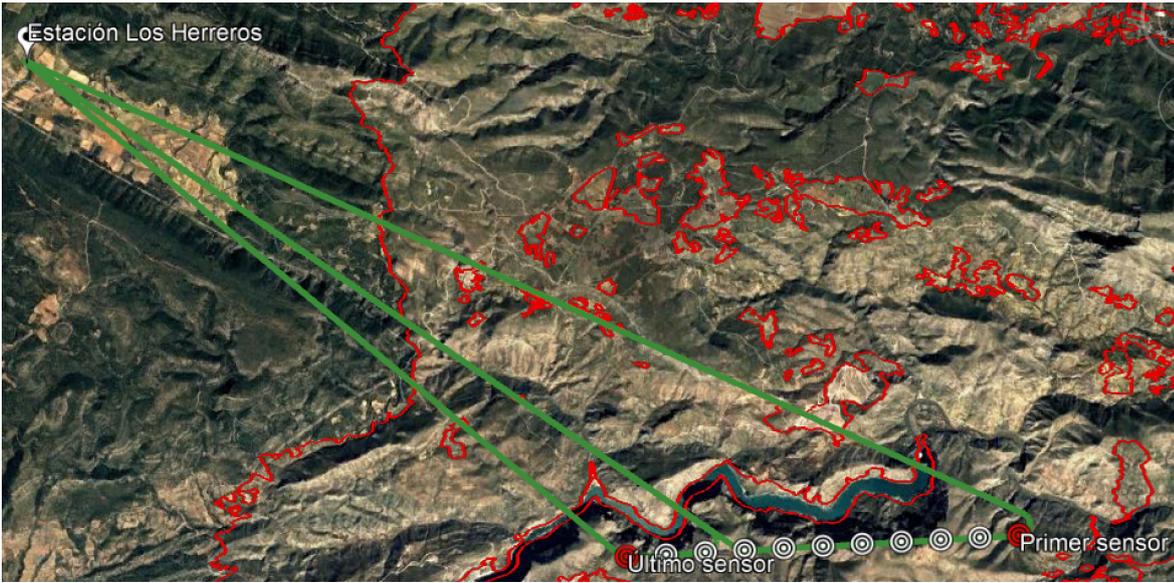


Figura 6.3: Ruta 1 representada [Fuente: Google Earth].

En este caso, se ha extrapolado el gasto de energía para cuando la aeronave transporte solamente 3 sensores, y así poder obtener un resultado más cercano a la realidad del consumo de batería.

La Tabla 6.3 contiene el consumo de batería y la distancia recorrida en esta ruta. El recorrido total de la ruta son 53.2 km, y el consumo de batería es del 75.6%, por lo que se llegaría a la estación con un 24.4% de batería restante. Como el total de la batería es mayor del 20%, la ruta se podría realizar con cierta seguridad.

En cambio la Figura 6.4, ilustra de forma más visual que la ruta no es lo más eficiente posible, ya que se recorren más kilómetros con la carga llena que con solo 3 sensores. Asimismo, también se puede observar que el porcentaje de kilómetros recorridos con carga (50%), es mayor a la distancia sin carga (41%), lo que resulta poco eficiente.

	Vuelta 1		Vuelta 2		Total	
	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)
Carga máxima	15,1	30,2	0	0	15,1	30,2
Bombardeo	3,5	7	1,1	2,2	4,6	9,2
Sin carga	11,6	11,6	10,4	10,4	22	22
Carga 3 sensores	0	0	11,5	14,2	11,5	14,2

Tabla 6.3: Distancia y batería de la ruta 1.



Figura 6.4: Gráficos de distancia y batería de la ruta 1.

Para mejorar la ruta, se ha pensado en realizar el recorrido en sentido opuesto pues, a priori, parece ser una solución para que el recorrido más largo, que antes se realizaba a máxima carga, esta vez se realizará con sólo 3 sensores. Este nuevo recorrido es el de la Figura 6.5.

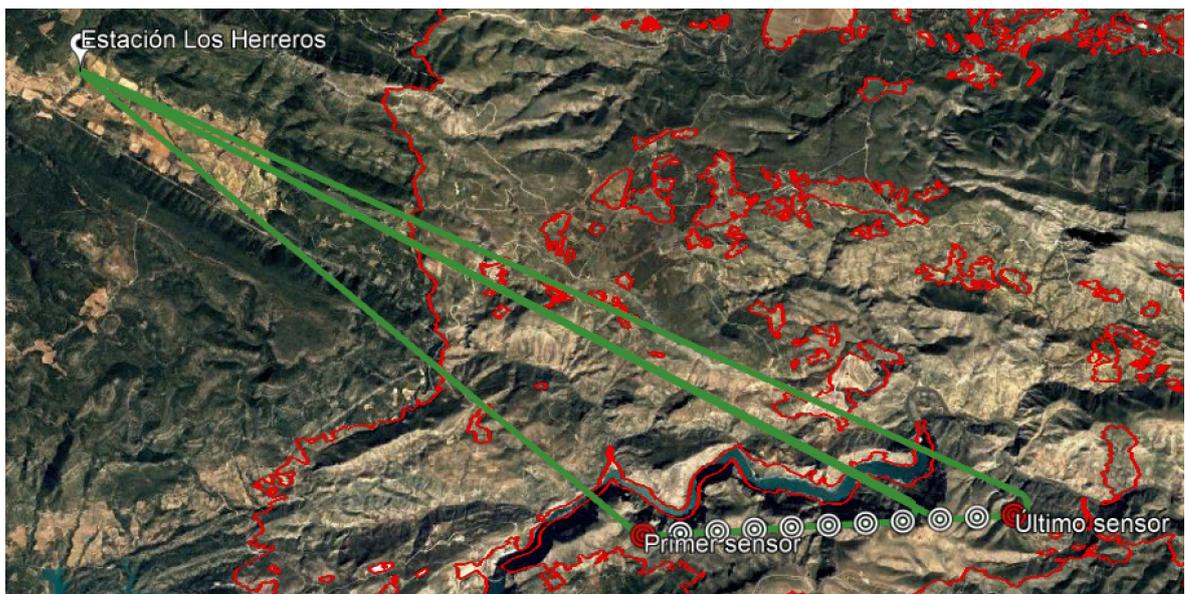


Figura 6.5: Ruta 1 representada tras modificar la dirección [Fuente: Google Earth].

Si solamente se observan los gráficos de la Figura 6.6, parece que la modificación de la ruta resulta en una mayor eficiencia, pues el 50 % de la distancia recorrida es sin carga. Sin embargo, la Figura 6.4 muestra que el consumo de batería no ha disminuido, sino que al contrario. Esto es debido a que al modificar la ruta, se ha aumentado la distancia recorrida a 57.6 km, por lo que aún recorriendo más distancia con la bodega vacía, el consumo ha aumentado al 75.8 % de la batería con respecto al 75.6 % anterior.

El aumento de consumo no es demasiado notable, sin embargo la distancia sí que lo es, puesto que en esta ruta se deberán recorrer 4.4 km más, lo que significa más tiempo, y además de querer que la ruta consuma la menor cantidad de energía posible, también

se quiere que se realice en el menor tiempo posible, pues se trata de una misión de emergencia dónde el tiempo siempre resulta un factor importante.

	Vuelta 1		Vuelta 2		Total	
	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)
Carga máxima	10,4	20,8	0	0	10,4	20,8
Bombardeo	3,6	7,2	1	2	4,6	9,2
Sin carga	13,8	13,8	15,1	15,1	28,9	28,9
Carga 3 sensores	0	0	13,7	16,9	13,7	16,9

Tabla 6.4: Distancia y batería de la ruta 1 tras modificar la dirección.



Figura 6.6: Gráficos de distancia y batería de la ruta 1 tras modificar la dirección.

Por último, se ha realizado una pequeña modificación en la ruta inicial para conseguir la mayor eficiencia posible. Para ello, en cada viaje, el trayecto más corto se realizará con la carga.

En la Tabla 6.5 se encuentra el resultado de mejorar la eficiencia de la ruta. En este caso, la distancia recorrida será exactamente la misma que la inicial por lo que, en principio, deberá tardar el mismo tiempo. Sin embargo el consumo de energía total será del 71.8 %, por lo que el dron llegará a la estación con cerca del 30 % de la batería.

	Vuelta 1		Vuelta 2		Total	
	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)
Carga máxima	11,6	23,2	0	0	11,6	23,2
Bombardeo	3,5	7	1,1	2,2	4,6	9,2
Sin carga	15,1	15,1	11,5	11,5	26,6	26,6
Carga 3 sensores	0	0	10,4	12,8	10,4	12,8

Tabla 6.5: Distancia y batería de la ruta 1 sin modificar la dirección pero mejorando su eficiencia.

6.3 Ruta 2: un viaje con carga máxima

El caso de la ruta 2 es mucho más sencillo que el anterior. En este caso solamente se deberán lanzar 8 sensores, por lo que con un solo viaje será suficiente.

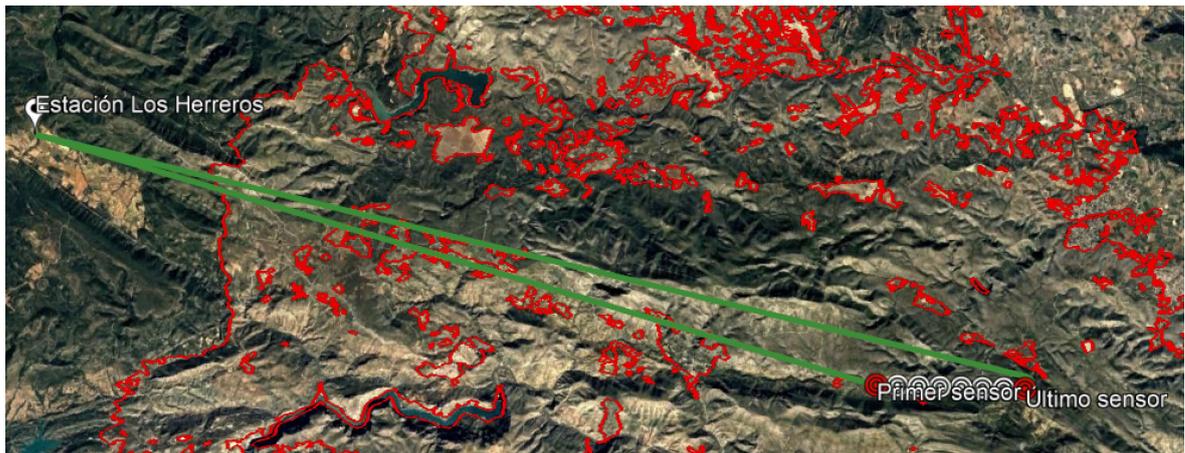


Figura 6.7: Ruta 2 representada [Fuente: Google Earth].

Para conseguir una ruta eficiente, lo único que puede intercambiarse es el camino de ida y vuelta. Para ello, se ha elegido directamente el camino más corto como ida, para así recorrer la mayor distancia sin carga.

En los gráficos de la Figura 6.8 se muestra que el camino elegido es el que consume menos batería. La distancia total recorrida es de 49.9 km, y el consumo de batería del 74.7%, llegando a la estación con el 25.3% de batería, lo que se considera suficiente para dar la ruta como buena.

	Total	
	Distancia (km)	Batería (%)
Carga máxima	21,1	42,2
Bombardeo	3,7	7,4
Sin carga	25,1	25,1

Tabla 6.6: Distancia y batería de la ruta 2.



Figura 6.8: Gráficos de distancia y batería de la ruta 2.

Cabe destacar que esta ruta es posible puesto que se trata de un solo viaje. En el caso de que la línea de fuego fuera mayor se debería estudiar cuál sería la mejor opción: aumentar la distancia entre sensores, reducir el tamaño de la línea de fuego, realizar un cambio de batería o utilizar dos drones.

6.4 Ruta 3: reducción de sensores

El caso de la ruta 3 es muy similar a la ruta 2, pues solamente se necesita un viaje para cubrir la línea de sensores, lo único que en este caso el dron solamente necesitará transportar 7 de estos.

En la Figura 6.10 se ha ampliado el bombardeo de la Figura 6.9, para poder apreciar que en este caso ha sido fácil decidir cuál sería el primer sensor en lanzarse. También se ha tenido en cuenta que la llegada al primer sensor es prácticamente recta, y en la vuelta se debe realizar una maniobra más elaborada para realizar el giro necesario, lo que se supone que también significará una facilidad de maniobra y un ahorro de batería, aunque se debería detallar mucho más el consumo del dron para cuantificarlo.

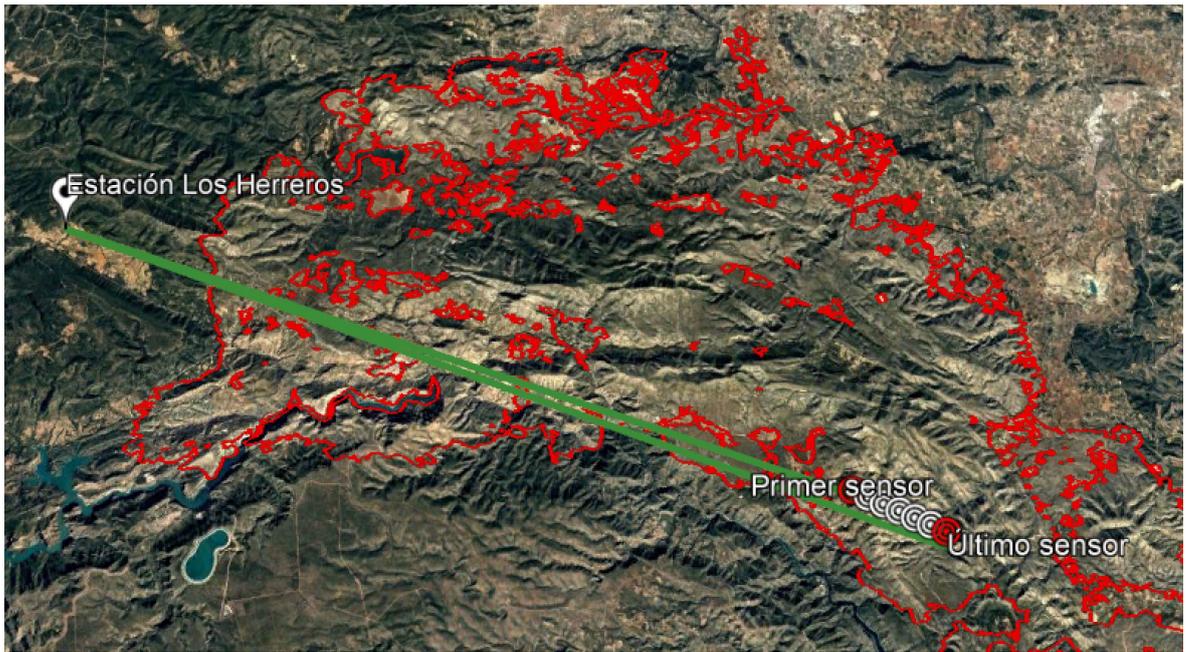


Figura 6.9: Ruta 3 representada [Fuente: Google Earth].

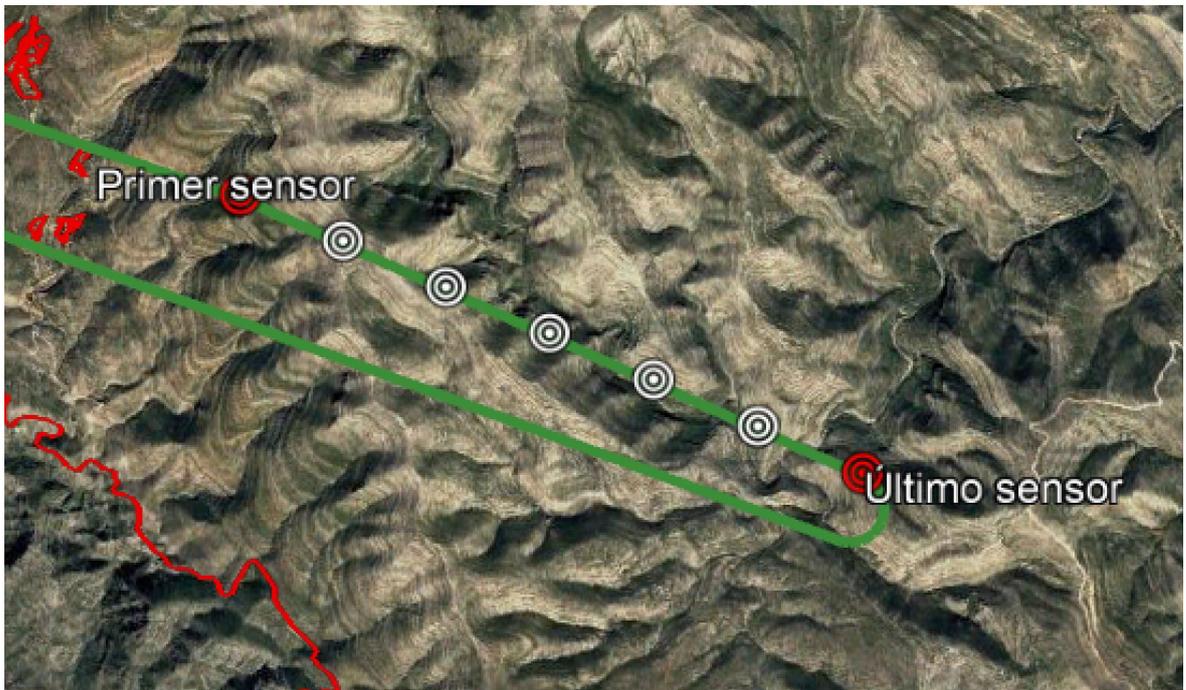


Figura 6.10: Bombardeo de la ruta 3 representado [Fuente: Google Earth].

La Tabla 6.7 y la Figura 6.11 resumen los datos de esta ruta. La misma recorre un total de 59.2 km y consume el 82.66 % de la batería, por lo que llegaría a la estación con el 17.34 % de la batería, lo que está por debajo de la tolerancia establecida.

Total		
	Distancia (km)	Batería (%)
7 sensores	26,3	46,76
Bombardeo	3	6
Sin carga	29,9	29,9

Tabla 6.7: Distancia y batería de la ruta 3.

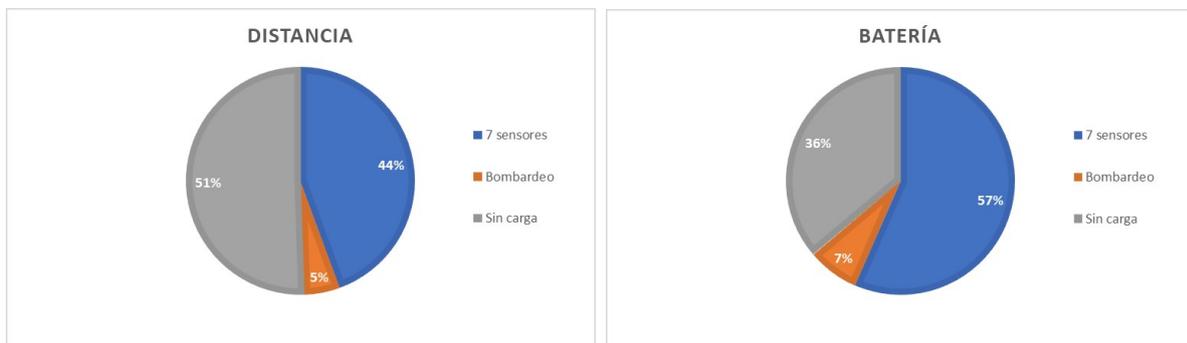


Figura 6.11: Gráficos de distancia y batería de la ruta 3.

Esta ruta no es posible tal y como se ha diseñado. Una solución posible para la viabilidad de esta ruta podría ser aumentar el espaciado de los sensores. En ese caso solamente harían falta 6 sensores, lo que disminuiría el peso de la aeronave y los datos quedarían como en la Tabla 6.8. En este caso se llegaría a la estación con el 22.02% de autonomía, por tanto se podría dar por buena.

Total		
	Distancia (km)	Batería (%)
6 sensores	26,3	42,08
Bombardeo	3	6
Sin carga	29,9	29,9

Tabla 6.8: Distancia y batería de la ruta 3 tras modificar la distancia entre sensores.

Sin embargo, aunque la ruta pasara de inviable a viable, se perdería exactitud en los datos, además de que se necesitaría una batería para el lanzamiento de solo 6 sensores, por lo que no resultaría una misión demasiado eficaz.

6.5 Ruta 4: cambio de estación

Sin la necesidad de realizar los cálculos de distancia y batería, es fácil percibir mediante las Figuras 6.12 y 6.13 que la ruta 4 va a presentar el mismo problema que la 3.

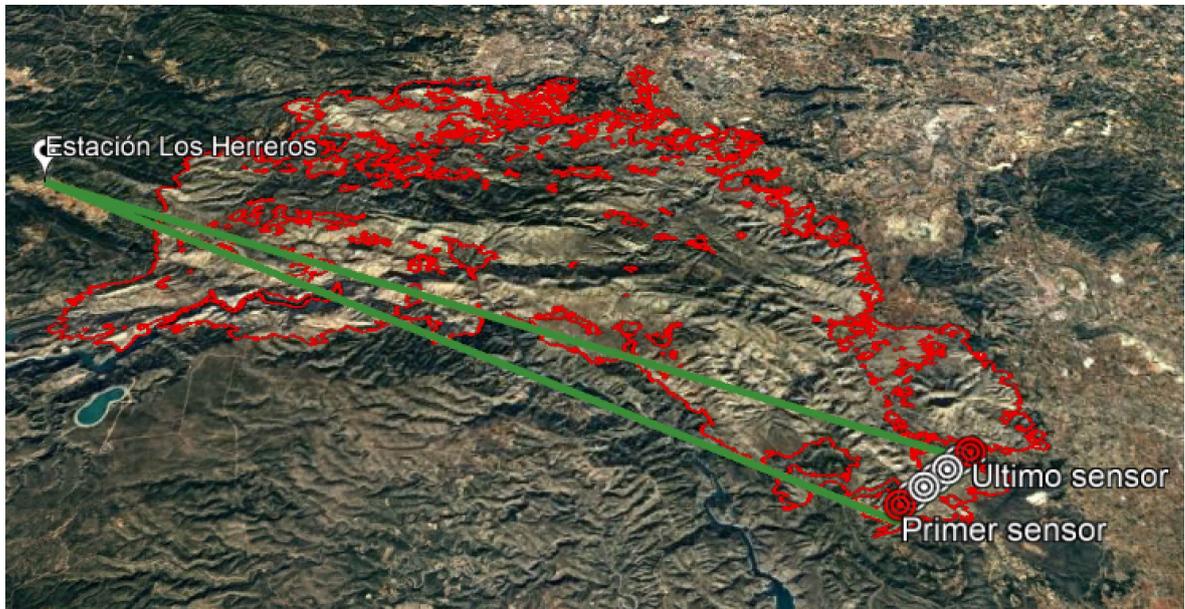


Figura 6.12: Ruta 4 representada [Fuente: Google Earth].



Figura 6.13: Bombardeo de la ruta 4 representado [Fuente: Google Earth].

La Tabla 6.9 y la Figura 6.14 confirman que así es, pues la ruta necesita más de una batería completa para realizar esta ruta.

Total		
	Distancia (km)	Batería (%)
7 sensores	34,4	61,16
Bombardeo	3,2	6,4
Sin carga	36	36

Tabla 6.9: Distancia y batería de la ruta 4.

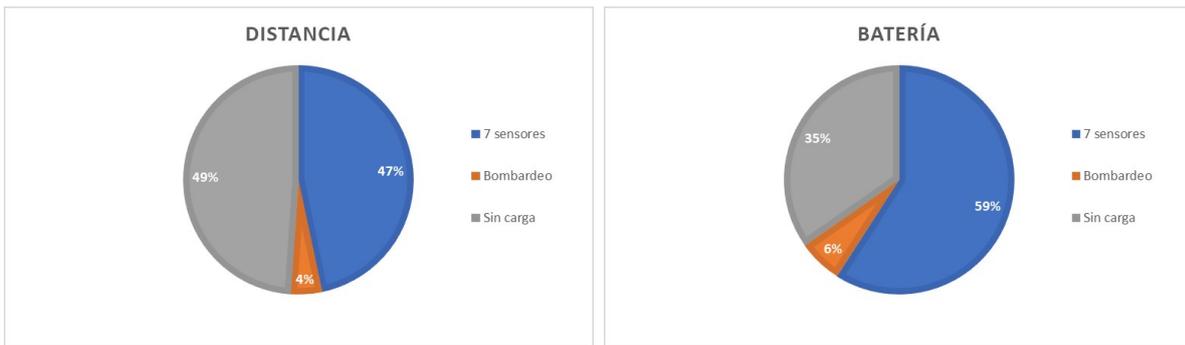


Figura 6.14: Gráficos de distancia y batería de la ruta 4.

El problema reside en la distancia entre la estación y la línea de fuego, pues la línea consta de 3.2 km, sin embargo, esta se encuentra a unos 35 km de la estación. Esto también implica que se deberá recorrer prácticamente todo el perímetro incendiado, lo que conlleva problemas de estabilización de la nave, corrientes de aire producidas por el fuego y otros obstáculos que pueden estar presentes.

Para solucionar este problema, se ha propuesto ubicar una nueva estación, más cercana a la líneas de fuego de las franjas 3 y 4. En la Figura 6.15 está señalizada la nuevas estación, que se ha colocado en Tous debido a la cercanía del municipio con el incendio. Cabe señalar que esta elección no tiene ningún carácter especializado, ya que se ha elegido por proximidad y para ver el efecto que tiene en la ruta.

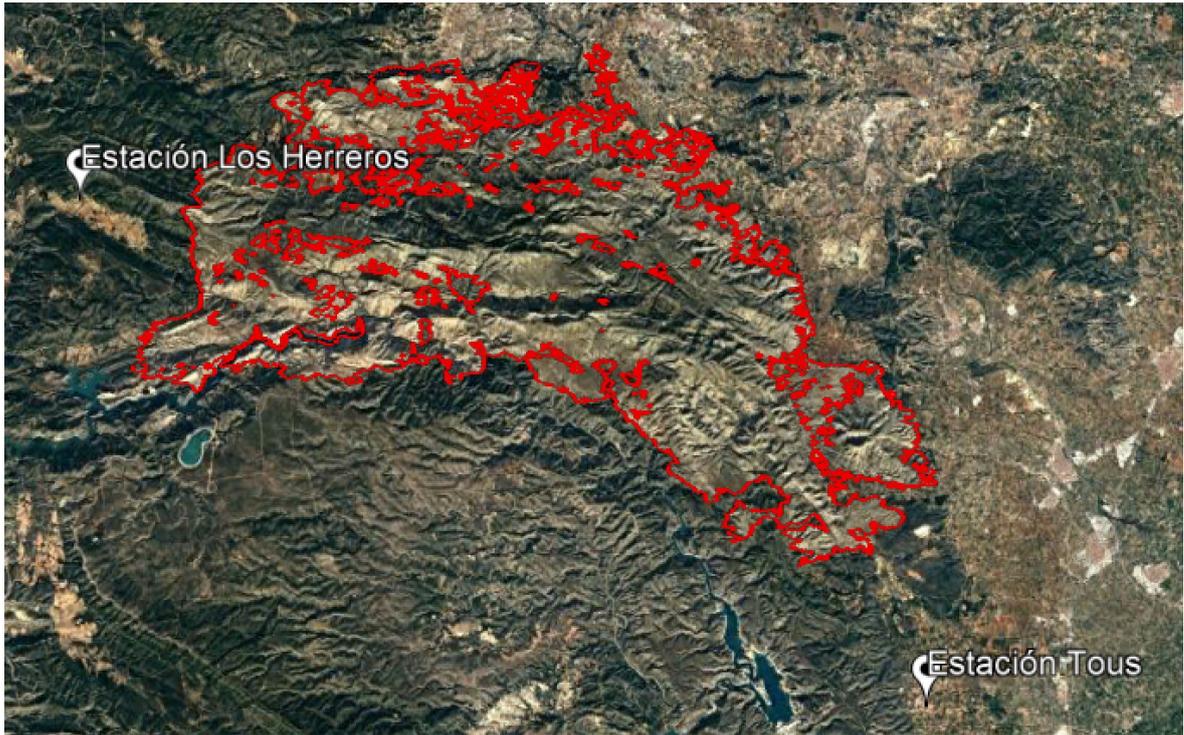


Figura 6.15: Estación de Los Herreros y estación de Tous representadas [Fuente: Google Earth].

La nueva ruta 4 es la que aparece en la Figura 6.16. El único cambio que se ha aplicado ha sido la ubicación de la estación, por lo que el número de sensores a repartir sigue siendo el mismo.

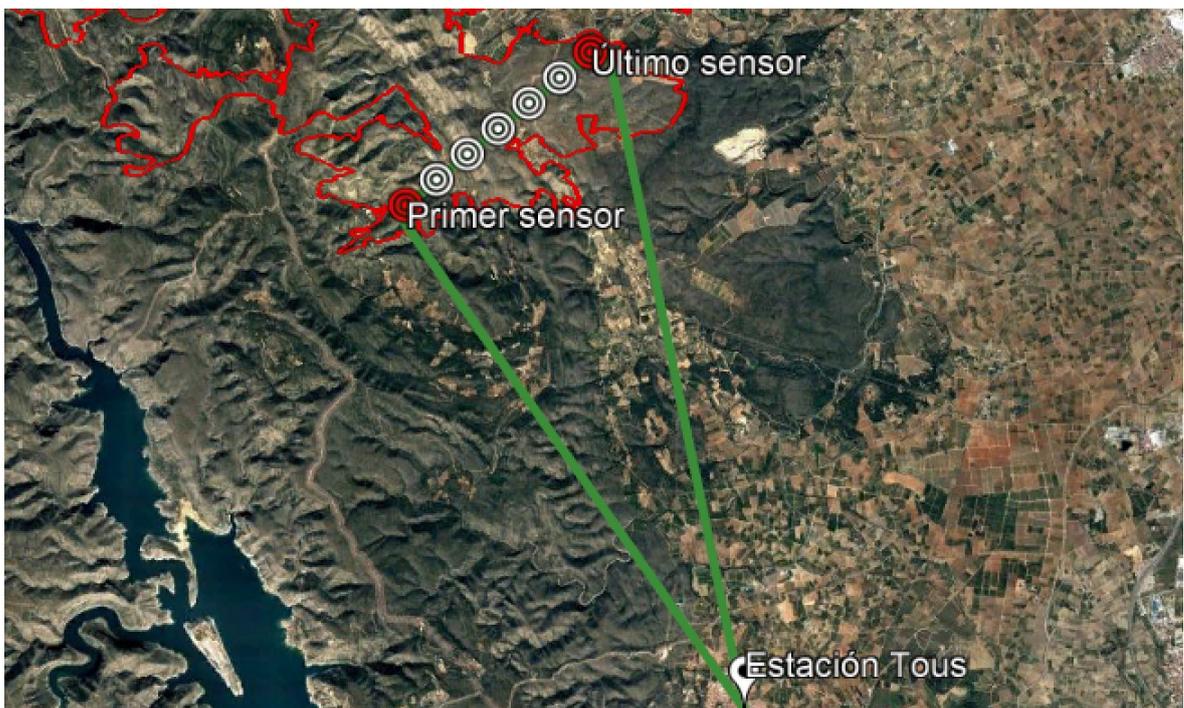


Figura 6.16: Ruta 4 representada tras cambiar la estación a Tous [Fuente: Google Earth].

De los datos de la Tabla 6.10 y la Figura 6.17 se puede extraer bastante información. En primer lugar, de una ruta mucho más corta que la anterior, con una distancia de 19.5 km y un consumo del 28.67% de la batería. Esto supondría llegar a la estación con el 71.33% de la batería, lo que se podría utilizar para el bombardeo de más sensores o para empezar la recolección de información y actuar como dron repetidor.

Total		
	Distancia (km)	Batería (%)
7 sensores	7,8	13,87
Bombardeo	3,1	6,2
Sin carga	8,6	8,6

Tabla 6.10: Distancia y batería de la ruta 4 tras cambiar la estación a Tous.

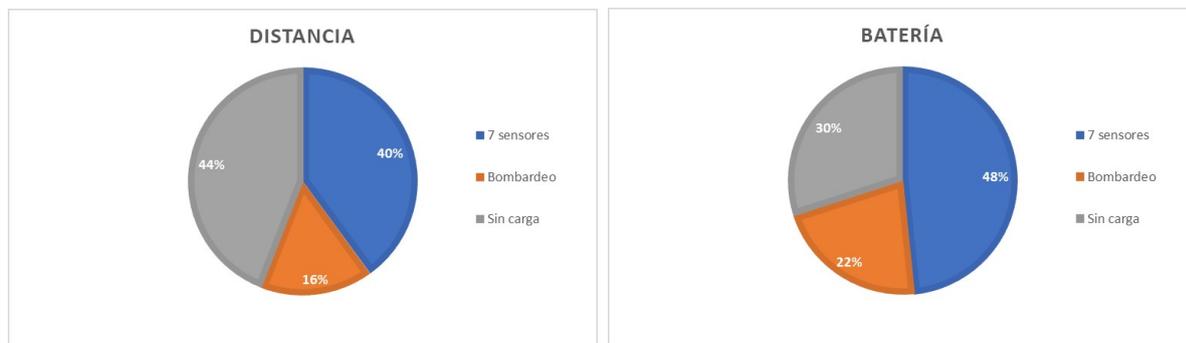


Figura 6.17: Gráficos de distancia y batería de la ruta 4 tras cambiar la estación a Tous.

Además, si se comparan las Figuras 6.14 y 6.17, se puede observar que los porcentajes del bombardeo rondan el 20%. Esto es señal de que la ruta es mucho más eficaz y que la rentabilidad de la misión aumenta.

En estos casos hay que analizar el tiempo y coste que tiene la misión y lo que supone enviar un dron consumiendo toda su batería para el lanzamiento de unos pocos sensores, y analizar todas las soluciones posibles.

Para el caso de la ruta 3 se podría aplicar la misma solución. Se ha realizado una prueba de esta ruta y constaría de 33.3 km, casi la mitad de la distancia si la ruta se realiza desde la Estación de Los Herreros. Además, la estación será mucho más provechosa si se puede utilizar para diferentes rutas o misiones, en lugar de establecer una nueva estación para un única ruta o para unos pocos sensores.

En el caso de las rutas 3 y 4, a diferencia de las dos primeras, se trata de un solo viaje. Esto se debe a que, inicialmente ya se ha detectado que estas rutas serían más problemáticas y que consumirían grandes cantidades de energía. Sin embargo, con el traslado de la estación se podría estudiar si sería ventajoso reducir la distancia entre sensores o prolongar la línea a cubrir.

6.6 Ruta 5: bombardeo de 2 líneas de fuego

La ruta 5 es la última ruta a analizar en este trabajo. Esta presenta una característica que la diferencia de las anteriores: la línea a cubrir está formada por dos líneas de diferente tamaño y dirección. Sin embargo, el programa diseñado es capaz de realizar este tipo de rutas. En la Figura 6.18 podemos ver el resultado.

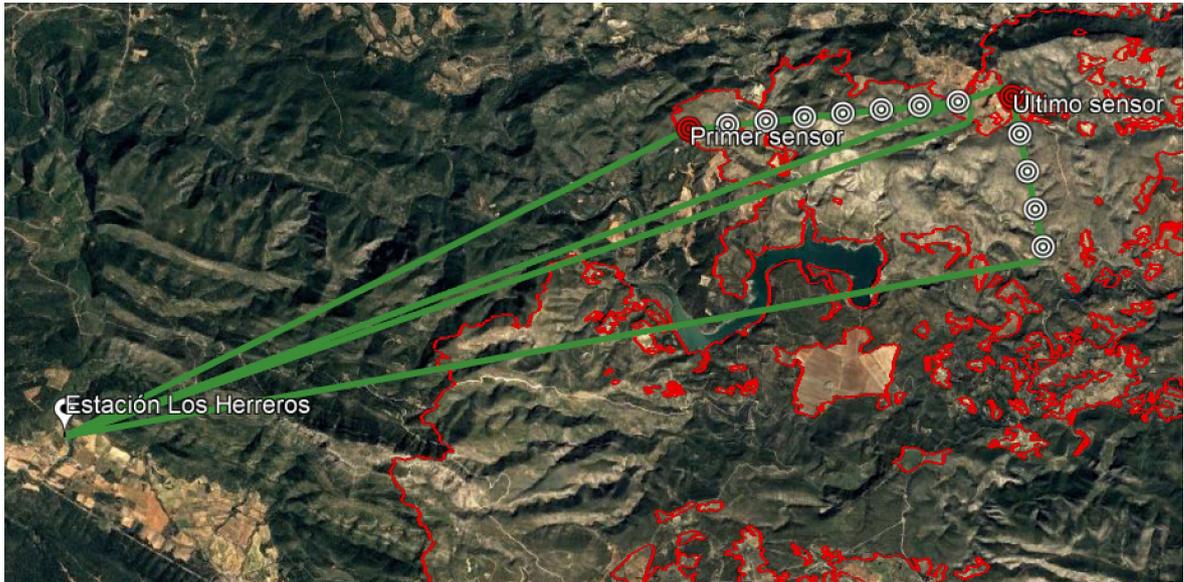


Figura 6.18: Ruta 5 representada [Fuente: Google Earth].



Figura 6.19: Bombardeo de la ruta 5 representado [Fuente: Google Earth].

Al presentar cierta cercanía con la Estación de los Herreros, esta ruta será posible realizarse con una sola batería. En este caso se llegará a la estación con el 24.1 % de la batería después de haber recorrido los 54.8 km que conforman la ruta.

En el caso de los gráficos, el bombardeo no representa un alto porcentaje de la ruta, sin embargo, se encuentra por encima del 10%. Al analizar la ruta también se contempla que tras el consumo de una batería se tendrá una parte importante del perímetro sensorizado, que al final es el objetivo principal de la misión.

	Vuelta 1		Vuelta 2		Total	
	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)	Distancia (km)	Batería (%)
Carga máxima	9,3	18,6	0	0	9,3	18,6
Bombardeo	3,6	7,2	2,2	4,4	5,8	11,6
Sin carga	13,1	13,1	13,4	13,4	26,5	26,5
Carga 5 sensores	0	0	13,2	19,2	13,2	19,2

Tabla 6.11: Distancia y batería de la ruta 5.



Figura 6.20: Gráficos de distancia y batería de la ruta 5.

Finalmente, en la Tabla 6.12 se ha recolectado los resultados finales de todas las rutas analizadas. Cabe destacar que el programa no es capaz de realizar estos cambios para mejorar la autonomía de la ruta, ya que algunas de estas decisiones deben ser tomadas y contempladas por un bombero para no poner en riesgo el correcto funcionamiento de la aeronave y no perjudicar a otros mecanismos de extinción que pueden coexistir junto al dron en el incendio.

	Ruta genérica	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4 (desde Tous)	Ruta 5
Distancia recorrida (km)	48,6	53,2	49,9	59,2	19,5	54,8
Sensores lanzados	16	11	8	6	7	13
Batería restante (%)	25,6	28,2	25,3	22,0	71,3	24,1

Tabla 6.12: Tabla resumen de las 6 rutas.

7. Presupuesto

En este capítulo se va a realizar un desglose de los costes para la realización de este proyecto. Estos se van a dividir en 4 tipos de costes diferentes para que estos sean los más aproximados posibles a la realidad.

7.1 Costes asociados al personal

En primer lugar se encuentra el gasto de recursos humanos. En este proyecto han formado parte dos profesores (tutor y cotutor) ingenieros de la universidad, además de un alumno de grado. En la Tabla 7.1 aparece el total de estos costes.

Recurso	Unidades [h]	Coste unitario [€/h]	Importe [€]
Tutor (Ingeniero informático)	80	30	2.400
Cotutor (Ingeniero forestal)	80	30	2.400
Ingeniero de grado (Ingeniera aeroespacial)	300	20	6.000
Total			10.800

Tabla 7.1: Costes asociados al personal.

7.2 Costes asociados a la amortización de equipos

La tabla 7.2 recoge los gastos asociados a la amortización de los equipos que se han utilizado a lo largo del proyecto. En este caso se trata del equipo de la Ciudad Politécnica de la Innovación, que se utilizó hasta que la presencialidad fue posible, y la utilización del equipo personal, utilizado simultáneamente con el anterior y, posteriormente, como único equipo.

Concepto	Precio[€]	Tiempo de amortización [meses]	Período útil [meses]	Coste [€]
Equipo profesional (CPI)	2.000	5	48	208,33
Equipo personal	600	12	48	150
Total				358,33

Tabla 7.2: Costes asociados a la amortización de hardware.

7.3 Costes asociados al software

El coste de las licencias del software utilizado viene expresado en la Tabla 7.3. En ella encontramos el programa Matlab, Google Earth y Office 365. De este último se ha utilizado la hoja de cálculo, así como el procesador de textos y su programa de presentaciones.

Concepto	Coste [€]
Matlab Profesional	2.000
Office 365	149
Google Earth	Gratuito
Total	2.149

Tabla 7.3: Costes asociados a las licencias de software.

7.4 Costes indirectos

Por último, en este apartado se recogen los gastos indirectos. Estos gastos incluyen la electricidad, la conexión a internet, los espacios utilizados, etc.

El coste de estos se encuentra en la Tabla 7.4 y su valor es del 12.5 % con respecto a los gastos anteriores.

Concepto	Coste [€]	Coste indirecto [€]
Costes humanos	10.800	1.350
Costes de software	2.069	258,63
Costes de hardware	358,33	44,79
Total		1.653,42

Tabla 7.4: Costes indirectos.

7.5 Coste total

Con el desglose de costes ya realizado es posible conocer el coste total de proyecto. Este es la suma de los gastos anteriores más la consideración del 21 % del IVA. La Tabla 7.5 incluye los gastos totales del proyecto.

Concepto	Coste [€]
Costes humanos	10.800
Costes de software	2.069
Costes de hardware	245,58
Costes indirectos	1.653,42
Total sin IVA	14.768,00
Total IVA (21 %)	17.869,28

Tabla 7.5: Coste global.

Así, el presupuesto total del proyecto asciende a 17 869,28€.

8. Conclusión y trabajos futuros

8.1 Conclusiones

El presente Trabajo Final de Grado ha estado dirigido a diseñar un sistema que sea capaz de establecer una ruta para dirigir a un dron al lanzamiento de sensores utilizados para monitorizar un incendio. Además, también ha sido clave poder estudiar el efecto del mismo en un incendio ya ocurrido, como fue el devastador incendio de 2012 en Cortes de Pallás.

Para ello, se ha estudiado el marco histórico, lo que involucra la evolución de los drones a lo largo de la historia, y la presencia de otros proyectos similares en marcha, que se asemejan pero que tienen características o propósitos diferentes al proyecto ETHON.

La legislación de los drones, a pesar de no ser demasiado concreta y de estar todavía en construcción, ha limitado la operación del dron, pues esta marca muchos factores como la altitud o los lugares en los que se puede operar.

El estudio del incendio también ha sido decisivo para saber como debería operar un dron en este caso, pues se ha visto que la climatología o la evolución del incendio pueden decidir si esta tecnología se puede aplicar en un momento dado.

A lo largo del diseño del código también se han encontrado ciertos obstáculos, aunque con todo lo aprendido a lo largo del grado ha sido posible encontrar soluciones a los problemas que han ido surgiendo.

Finalmente, la aplicación del código a cinco rutas diferentes muestra todos los posibles efectos adversos que pueden aparecer en una situación de emergencia como es un incendio, y se han querido mostrar algunas soluciones para poder seguir trabajando con esta tecnología que sigue siendo muy beneficiosa para la problemática de los incendios forestales.

A pesar de lo que puede favorecer un código de programación como el diseñado en este trabajo, hay ciertos inconvenientes que este no es capaz de solucionar. Por ello es tan importante conocer el contexto en el que se trabaja y poder encontrar la mejor opción, teniendo en cuenta la viabilidad y la eficiencia.

8.2 Conclusiones personales

La principal motivación a lo largo de la realización de este trabajo ha sido la confianza por parte del equipo del proyecto ETHON.

Resulta muy interesante poder aplicar los conocimientos que se han obtenido a lo largo del grado, y poder poner en común ideas, ya no sólo con los tutores, quienes son parte del proyecto, sino con el personal de otras empresas como UAV Works o con profesionales del cuerpo de bomberos.

Sin embargo, este trabajo ha estado limitado por la pandemia vivida actualmente, lo que ha impedido la realización de pruebas de vuelo, para la verificación del buen funcionamiento del código.

La realización de este trabajo ha permitido un crecimiento tanto personal como profesional, descubriendo que, además de adquirir muchos conceptos relacionados con el sector aeroespacial, también se ha mejorado la capacidad de solventar problemas y el desarrollo del ingenio, lo que resulta realmente enriquecedor.

8.3 Trabajos futuros

En esta sección se incluyen algunos proyectos que pueden suceder a este trabajo, tanto para corregir algunos errores, como para mejorarlo:

- Incluir en el código información sobre la velocidad del dron, la altitud de vuelo y la velocidad del tiempo para que este puede calcular automáticamente el consumo de la ruta.
- A partir de la mejor anterior, añadir el dato del número de recargas que se necesitarán para completar una o varias rutas.
- Diseñar una plataforma interactiva mediante la cual se facilite la introducción de las coordenadas de las líneas de fuego.
- Mostrar la ruta en un mapa a tiempo real que permita rediseñar la ruta cuando se encuentren obstáculos que puedan poner en peligro a la aeronave.

Además de los posibles trabajos anteriormente citados, también se propone un trabajo conjuntamente con la empresa Pyro Fire Extinction que consiste en calcular la trayectoria del sensor que ha sido lanzado teniendo en cuenta factores como la velocidad del dron y del viento, así como la altura, y saber en qué punto exacto se debería soltar para que cayese en la ubicación deseada.

ANEXO I. Funciones básicas

Descripción	Calcula los puntos de paso y los puntos dónde se deberá lanzar un sensor a partir de las coordenadas de la estación y del primer y último punto dónde deberá lanzarse un sensor. Se tendrá en cuenta la distancia entre sensores, la capacidad del dron en cada viaje y el radio de giro del mismo.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp, wp_sens] = lanzamiento (late, lone, lati, loni, latf, lonf, cap, d, r)</code>
Parámetros de entrada	<p>late = latitud de la estación (grados)</p> <p>lone = longitud de la estación (grados)</p> <p>lati = latitud del primer sensor (grados)</p> <p>loni = longitud del primer sensor (grados)</p> <p>latf = latitud del último sensor (grados)</p> <p>lonf = longitud del último sensor (grados)</p> <p>cap = número máximo de sensores que puede transportar el dron</p> <p>d = distancia entre sensores (metros)</p> <p>r = radio de giro de la aeronave (metros)</p>
Parámetros de salida	<p>wp = matriz de puntos de paso que deberá recorrer el dron</p> <p>wp_sens = matriz de puntos de paso dónde se deberá lanzar un sensor</p>

Tabla A.1: Función `lanzamiento.m`.

Descripción	Calcula el ángulo entre el vector norte y el vector formado por las coordenadas de la estación y las coordenadas del primer sensor.
Sintaxis de MATLAB	<code>[alpha] = angulo (late, lone, lati, loni)</code>
Parámetros de entrada	<p>late = latitud de la estación (grados)</p> <p>lone = longitud de la estación (grados)</p> <p>lati = latitud del primer sensor (grados)</p> <p>loni = longitud del primer sensor (grados)</p>
Parámetros de salida	alpha = ángulo entre el vector estación - primer punto y el vector norte

Tabla A.2: Función `angulo.m`.

Descripción	Gira las coordenadas inicial y final un determinado ángulo alpha.
Sintaxis de MATLAB	<code>[lati,loni,latf,lonf] = rotacion_ini (late,lone,lati,loni,latf,lonf,alpha)</code>
Parámetros de entrada	late = latitud de la estación (grados) lone = longitud de la estación (grados) lati = latitud del primer sensor (grados) loni = longitud del primer sensor (grados) latf = latitud del último sensor (grados) lonf = longitud del último sensor (grados) alpha = ángulo de rotación (radianes)
Parámetros de salida	lati = latitud del primer sensor rotada (grados) loni = longitud del primer sensor rotada (grados) latf = latitud del último sensor rotada (grados) lonf = longitud del último sensor rotada (grados)

Tabla A.3: Función `rotacion_ini.m`.

Descripción	Crea una matriz con los puntos de paso necesarios para ir de la estación a las coordenadas del primer sensor, teniendo en cuenta el radio de giro del dron.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = ida (lati,loni,late,lone,latf,lonf,r)</code>
Parámetros de entrada	lati = latitud del primer sensor (grados) loni = longitud del primer sensor (grados) late = latitud de la estación (grados) lone = longitud de la estación (grados) latf = latitud del último sensor (grados) lonf = longitud del último sensor (grados) r = radio de giro del dron (metros)
Parámetros de salida	wp = matriz de puntos de paso

Tabla A.4: Función `ida.m`.

Descripción	Calcula las coordenadas cartesianas del centro de la circunferencia del radio de giro.
Sintaxis de MATLAB	<code>[xcc,ycc] = ccircunferencia (lati,loni,latf,lonf,r)</code>
Parámetros de entrada	lati = latitud del punto inicial (grados) loni = longitud del punto inicial (grados) latf = latitud del punto final (grados) lonf = longitud del punto final (grados) r = radio de giro (metros)
Parámetros de salida	xcc = abscisa del centro de la circunferencia ycc = ordenada del centro de la circunferencia

Tabla A.5: Función `ccircunferencia.m`.

Descripción	Calcula los puntos de tangencia entre la circunferencia con centro en el primer punto y radio de valor r y la línea formada por los puntos xe, ye, xcc e ycc.
Sintaxis de MATLAB	<code>[xa,ya,xb,yb] = ptangencia (xe,ye,xcc,ycc,r)</code>
Parámetros de entrada	xe = abscisa de la estación ye = ordenada de la estación xcc = abscisa del centro de la circunferencia ycc = ordenada del centro de la circunferencia r = radio de giro (metros)
Parámetros de salida	xa = abscisa del primer punto de tangencia ya = ordenada del primer punto de tangencia xb = abscisa del segundo punto de tangencia yb = ordenada del segundo punto de tangencia

Tabla A.6: Función `ptangencia.m`.

Descripción	Calcula la matriz de puntos de paso para ir de la estación al punto de tangencia en la ida.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = estacion_i (lati, loni, latf, lonf, wpf)</code>
Parámetros de entrada	lati = latitud del punto inicial (grados) loni = longitud del punto inicial (grados) latf = latitud del punto final (grados) lonf = longitud del punto final (grados) wpf = punto de paso al que se desea llegar
Parámetros de salida	wp = matriz de puntos de paso

Tabla A.7: Función `estacion_i.m`.

Descripción	Calcula la matriz de puntos de paso para recorrer el giro inferior de la circunferencia en la ida.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = giroi_ida (xcc,ycc,r,x)</code>
Parámetros de entrada	xcc = abscisa del centro de la circunferencia ycc = ordenada del centro de la circunferencia r = radio de giro (metros) x = matriz (array) que contiene las abscisas inicial y final del giro
Parámetros de salida	wp = matriz de puntos de paso

Tabla A.8: Función `giroi_ida.m`.

Descripción	Calcula la matriz de puntos de paso para recorrer el giro superior de la circunferencia en la ida.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = giros_ida (xcc,ycc,r,x)</code>
Parámetros de entrada	<p><code>xcc</code> = abscisa del centro de la circunferencia</p> <p><code>ycc</code> = ordenada del centro de la circunferencia</p> <p><code>r</code> = radio de giro (metros)</p> <p><code>x</code> = matriz (array) que contiene las abscisas inicial y final del giro</p>
Parámetros de salida	<code>wp</code> = matriz de puntos de paso

Tabla A.9: Función `giros_ida.m`.

Descripción	Crea las matrices de puntos de paso que representan el recorrido del dron y los puntos dónde se deberá lanzar un sensor. Estos puntos se determinan a partir de los puntos inicial y final, la distancia entre sensores y la capacidad del dron para transportar sensores.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp,wp2] = bombardear (lati, loni, latf, lonf, d, cap)</code>
Parámetros de entrada	<p><code>lati</code> = latitud del primer sensor (grados)</p> <p><code>loni</code> = longitud del primer sensor (grados)</p> <p><code>latf</code> = latitud del último sensor (grados)</p> <p><code>lonf</code> = longitud del último sensor (grados)</p> <p><code>d</code> = distancia entre sensores (metros)</p> <p><code>cap</code> = número de sensores que se deben lanzar</p>
Parámetros de salida	<p><code>wp</code> = matriz de puntos de paso</p> <p><code>wp2</code> = matriz de puntos de paso dónde se deberá lanzar un sensor</p>

Tabla A.10: Función `bombardear.m`.

Descripción	Crea una matriz con los puntos de paso necesarios para ir del último sensor a la estación, teniendo en cuenta el radio de giro del dron.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = vuelta (lati, loni, late, lone, latf, lonf, r)</code>
Parámetros de entrada	<p><code>lati</code> = latitud del primer sensor (grados)</p> <p><code>loni</code> = longitud del primer sensor (grados)</p> <p><code>late</code> = latitud de la estación (grados)</p> <p><code>lone</code> = longitud de la estación (grados)</p> <p><code>latf</code> = latitud del último sensor (grados)</p> <p><code>lonf</code> = longitud del último sensor (grados)</p> <p><code>r</code> = radio de giro del dron (metros)</p>
Parámetros de salida	<code>wp</code> = matriz de puntos de paso

Tabla A.11: Función `vuelta.m`.

Descripción	Calcula la matriz de puntos de paso para recorrer el giro superior de la circunferencia en la vuelta.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = giros_vuelta (xcc,ycc,r,x)</code>
	xcc = abscisa del centro de la circunferencia ycc = ordenada del centro de la circunferencia
Parámetros de entrada	r = radio de giro (metros) x = matriz (array) que contiene las abscisas inicial y final del giro
Parámetros de salida	wp = matriz de puntos de paso

Tabla A.12: Función `giros_vuelta.m`.

Descripción	Calcula la matriz de puntos de paso para recorrer el giro inferior de la circunferencia en la vuelta.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = giro_i_vuelta (xcc,ycc,r,x)</code>
	xcc = abscisa del centro de la circunferencia ycc = ordenada del centro de la circunferencia
Parámetros de entrada	r = radio de giro (metros) x = matriz (array) que contiene las abscisas inicial y final del giro
Parámetros de salida	wp = matriz de puntos de paso

Tabla A.13: Función `giro_i_vuelta.m`.

Descripción	Calcula la matriz de puntos de paso para ir del último punto de tangencia a la estación en la vuelta.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = estacion_v (latf, lonf, late, lone, wpi)</code>
	latf = latitud del punto final (grados) lonf = longitud del punto final (grados)
Parámetros de entrada	late = latitud de la estación (grados) lone = longitud de la estación (grados) wpi = punto de paso de partida
Parámetros de salida	wp = matriz de puntos de paso

Tabla A.14: Función `estacion_v.m`.

Descripción	Gira las coordenadas de los puntos de paso un determinado ángulo alpha.
Sintaxis de MATLAB	<code>[wp] = rotacion (wp,alpha,late,lone)</code>
Parámetros de entrada	wp = matriz de puntos de paso alpha = ángulo de rotación (radianes) late = latitud de la estación (grados) lone = longitud de la estación (grados)
Parámetros de salida	wp = matriz de puntos de paso girados

Tabla A.15: Función `rotacion.m`.

ANEXO II. Fichas técnicas

B.1 VALAQ 120

TECHNICAL SPECS

AIRCRAFT & PERFORMANCE

Wingspan	1200mm
Height (landed)	60mm
Package dimensions	1250mm x 650mm x 450mm
Empty Weight (including batteries)	2,6kg
Maximum Take-off Weight	3,5kg
Max efficiency cruise speed	70km/h – 37.8kn – 19.4m/s
Max cruise airspeed	90km/h – 48,6kn – 25m/s
Max wind resistance	30km/h – 16,2kn – 8,3m/s
Max service ceiling (ASL)	2500m

AUTOPILOT AND MISSION

Position Accuracy (during flight)	Vertical: $\pm 1m$ Horizontal: $\pm 3m$
Position Accuracy (hover with standard GPS)	Vertical: $\pm 0.5m$ Horizontal: $\pm 1.5m$
Position Accuracy (take-off and landing)	Vertical: $\pm 0.1m$ Horizontal: $\pm 0.2m$
Max mission waypoints	Up to 65000

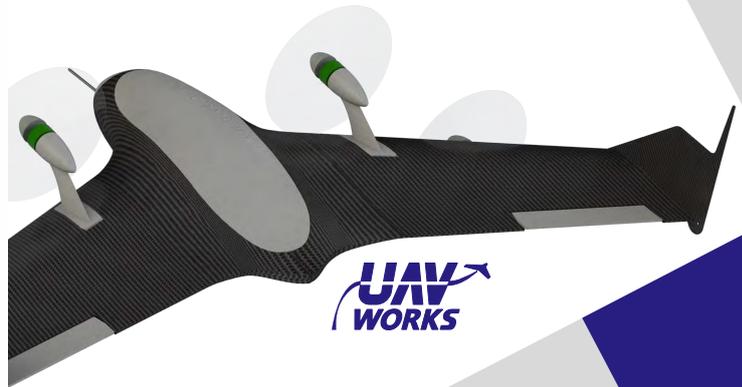
PAYLOAD

Max payload dimensions	180mm x 140mm x 45mm
Max payload weight	800g
Max power consumption	30W (from onboard power supply)

COMMUNICATION AND STREAM LINKS

Transmission protocol	UDP (secured by password)
Max Bandwidth	20Mbps
Max on board camera stream resolution	1920 x 1080px
On board camera stream fps @ FHD	24fps
Data consumption by flight @ FHD	6GB

VALAQ-120



 uaworks.es

 info@uaworks.es

WHAT IS IT?

The VALAQ-120 is the perfect aerial tool for your needs. A combination of efficiency, endurance and capability. Designed for long flight times and large ranges in mind, it offers the combination of a regular vertical take-off and landing drone system (VTOL) with the power efficiency of a fixed wing, resulting in an outstanding **2 hours continuous flight**.

The results of this concept are clear: longer flight times, mechanical simplicity and unrestricted infrastructure-limitation operation.

The VALAQ-120 is meant to be used as a high performance aerial platform for different professional activities.

SURVEILLANCE & SECURITY

Equipped with the newest technology to perform any type of image capture mission:

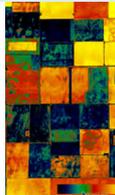
- Target tracking with 12x zoom
- Target geolocation (speed and direction)
- Simultaneous thermal image capture
- High resolution live stream to the ground station



AERIAL MAPPING AND PHOTOGRAMETRY

Great performance as multispectral, and high resolution image capture platform. With a max surface recognition of 400ha per flight. Mount any camera that fits your needs.

- 180mm x 140mm x 45mm dimensions.
- Up to 800g to perform a 120min flight.



COURIER MAIL

The versatility and efficiency of the VALAQ-120 makes it an ideal platform to perform long range missions.

- Normalized 130km range with 500g payload.
- Monitored mission both VLOS and BVLOS operation.
- Auto-drop system integration.



KEY FEATURES

- **Fully Autonomous Operation.** Don't worry about anything, the VALAQ-120 can perform any mission in full auto mode, just prepare the mission, arm and command start mission.
- **Longer flight times.** Up to 120 minutes with 3,5 kg maximum take-off weight.
- **No take-off and landing infrastructure required.** You can take-off and land anywhere, just like a regular multirotor.
- **High flight efficiency increase.** In fixed wing mode, the power consumption reduces up to 45% for an equivalent hovering system.
- **Mechanical simplicity.** Unlike other VTOL systems, the VALAQ-120 doesn't need pivoting motors and fixed wing flight extra propellers.
- **Low maintenance.** The full electric system with minimum mechanical parts translates into less maintenance and lower operational costs.
- **Control, communication and streaming over 4G.** All communications between the aircraft and the ground station are based on 4G, offering theoretical unlimited range.
- **In house design and manufacturing.** The aircraft has been developed inside the company by our Aerospace Engineers, searching for optimization and performance in every aspect of the VALAQ-120.
- **Full carbon fiber structure.** Highly optimized aerospace structure with custom manufactured panels and skin.
- **Laser altitude precision control.** Up to 120m with 1cm resolution and 10cm precision.
- **Collision avoidance.** The camera-based system rises the safety in any operation both manual and auto.
- **Precision take-off and landing.** The infrared beacon-based landing allows to land within 5cm.
- **Auto-drop system for cargo.** No landing needed if you require to drop your cargo in an specified location.



Bibliografía

- [1] Darling D. (2016). *Kettering Bug*. David Darling. https://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kettering_Bug.html [Consultado el 16 de junio de 2021].
- [2] Botzum R. A. (1985). *50 years of target dron aircraft*. Northrop.
- [3] Cuadra A.; Whitlock C. (2014). *How drones are controlled*. Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/wp-srv/special/national/dron-crashes/how-drones-work/> [Consultado el 16 de junio de 2021].
- [4] Pérez J. M. (2016). *Sistema de vigilancia adaptativo basado en la coordinación de UAVs en entornos afectados por catástrofes*. (Trabajo Final de Grado) Universidad de Castilla-La Mancha.
- [5] Koh L. P.; Wich S. A. (2012). Dawn of Drone Ecology: Low-Cost Autonomous Aerial Vehicles for Conservation. *Tropical Conservation Science*, 5(2) 121–132. <https://doi.org/10.1177/194008291200500202>.
- [6] Telefonica. (2020). *Drones contra incendios: los nuevos guardabosques*. Blogthinkbig.com. <https://blogthinkbig.com/peoplefirst/drones-contra-incendios> [Consultado el 17 de junio de 2021].
- [7] Varios autores. (2018). *Gestión de incendios forestales en el contexto del cambio climático*. Universitat de Valencia.
- [8] Jeziorska J. (2019). UAS for Wetland Mapping and Hydrological Modeling. *Remote Sensing*, 11(17) 1997. <https://doi.org/10.3390/rs11171997>.
- [9] Pyro Fire Extinction. (2021). *Bseed DROP*. <http://www.pyro.es/bseeddrop/> [Consultado el 16 de junio de 2021].
- [10] UAVWorks. (2020). *Valaq 120 contraincendios*. UAV Works Group. <http://www.uavworks.es/2019/03/29/valaq-120-contraincendios/> [Consultado el 16 de junio de 2021].
- [11] Prevenió d’Incendis Forestals. (2012). *Incendio de Cortes de Pallàs*. Generalitat Valenciana: Conselleria de govenació i justícia.
- [12] RTVE. (2012). *Incendios de Cortes y Andilla arrasan 48.000 hectáreas*. RTVE.es. <https://www.rtve.es/noticias/20120703/hectareas-quemadas-incendios-valencia-cortes-pallas-andilla/541279.shtml> [Consultado el 17 de junio de 2021].

- [13] Delgado V. (2019). *Historia de los drones. Desde el siglo XIX hasta el 2016: evolución y surgimiento del dron moderno*. El Drone. <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/> [Consultado el 17 de junio de 2021].
- [14] Sullivan J. M. (2005). Revolution or evolution? The rise of the UAVs. *IEEE Technology and Society Magazine* 94–101. <https://doi.org/10.1109/istas.2005.1452718>.
- [15] Everett H. R.; Toscano M. (2015). *Unmanned Systems of World Wars I and II*. Amsterdam University Press.
- [16] Department of the air force (USA). (2007). *Fact sheet: MQ-1 PREDATOR*. https://www.norton-marchaircrew.org/assets/MQ-1_Predator_Fact_Sheet.pdf [Consultado el 17 de junio de 2021].
- [17] Mathias H. D. (2016). An autonomous drone platform for student research projects. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 31 12–20. <https://doi.org/10.5555/2904298.2904301>.
- [18] CORDIS Unit (Ed.). (2008). Forest fire monitoring with unmanned aerial vehicles. *Research*EU*, 6 21. <https://cordis.europa.eu/article/id/400707-results-supplement-no-006/es> [Consultado el 17 de junio de 2021].
- [19] Linares I. M. (2019). *Emisiones de CO2 por incendios forestales*. Osbodigital. Todo sobre gestión forestal. <https://osbodigital.es/2018/12/31/emisiones-de-co2-por-incendios-forestales/> [Consultado el 16 de junio de 2021].
- [20] Albaladejo P. (2020). *Programación de rutas para la navegación aérea de un dron repetidor de datos como ayuda en la lucha contra incendios forestales*. (Trabajo Final de Grado) Universitat Politècnica de València.
- [21] Tang L.; Shao G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4) 791–797. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>.
- [22] Adams S. M.; Friedland C. J. (2011). A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management. *Louisiana State University*.